

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Оптичних та оптико-електронних приладів

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 621.384.3

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В. Г. Колобродов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2019р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: Багатоканальна оптико-електронна система спостереження

Виконав: студент 6 - го курсу, групи ПО-81мп

(шифр групи)

Бортнік Віталій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник професор, д.т.н., Боровицький В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант д.е.н., доцент, Бояринова К.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2019 року

АНОТАЦІЯ

БАГАТОКАНАЛЬНА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Обсяг роботи – 99 сторінок;

Кількість ілюстрацій - 21;

Кількість таблиць - 33;

Кількість джерел за посиланням - 34.

Актуальність. Багатоканальні оптико-електронні системи мають широкий спектр застосування. Починаючи від військової сфери та розвідки закінчуючи аграрною сферою та робототехнікою. Багатоканальні оптико-електронні системи можуть використовуватись для наступних задач:

- Отримання панорамних знімків місцевості, для військових і розвідки.
- Створення карт полів та насаджень, для аграріїв.
- Розширення поля зору до 180° і більше, в робототехніці.

Існуючі багатоканальні системи націлені на військове застосування, та в основному мають великі габарити та значну ціну, що в свою чергу приводить до необхідності використовувати спеціальні засоби для експлуатації таких систем. Ці недоліки також звужують коло осіб та підприємств, що можуть використовувати дані системи. Враховуючі дані фактори, можна однозначно сказати, що покращення і розробка нових типів багатоканальних оптико-електронних систем є актуальною.

Об'єкт дослідження. Процес формування цифрового зображення в багатоканальній оптико-електронній системі спостереження.

Предмет дослідження. Інтелектуальна камера для безпілотного літального апарата.

Ціль. Розробити модель інтелектуальної багатоканальної системи спостереження з малими габаритами для використання з безпілотними літальними апаратами.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні завдання:

- Зроблено огляд існуючих багатоканальних систем спостереження та інтелектуальних систем для безпілотних літальних апаратів.
- Виконано підбір комплектної бази для макета багатоканальної системи.
- Досліджено формування зображення в багатоканальній оптико-електронній системі.
- Виконано інженерні розрахунки.
- Розроблено стартап проект компанії по виготовленню багатоканальних систем.

Публікації.

1. Спеціальне приладобудування: стан та перспективи, збірник наукових праць третьої Української науково-технічної конференції. Казенне підприємство спеціального приладобудування "Арсенал". Review of distortion calibration.
2. 20-та Міжнародна конференція молодих вчених з питань оптики та високотехнологічних матеріалів - SPO 2019. Image stitching in unnamed air vehicle.
3. XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», збірник праць конференцій. Using correlation filters to support the UAV.
4. VII Міжнародна конференції оптико-електронних інформаційних технологій «Photonics-ODS 2018», збірник тез конференції. A review on image stitching.
5. XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», збірник праць конференції. Efficiency of calibration of distortion in uav vision systems.

Ключові слова. Склейка зображень, панорами, БПЛА, інтелектуальні системи.

ABSTRACT

MULTI-CHANNEL OPTO-ELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEMS

Workload - 99 pages;

Number of illustrations - 21;

Number of tables - 33;

Number of sources per link - 34.

Topicality. Multi-channel optoelectronic systems have a wide range of applications. Starting from the military sphere and exploration ending with the agrarian sphere and robotics. Multichannel optical-electronic systems can be used for the following tasks:

- Get panoramic images of the terrain, for military and intelligence.
- Creation of field and plantation maps for farmers.
- Expanding field of view to 180 ° or more in robotics.

Existing multi-channel systems are targeted at military applications, and generally have large dimensions and considerable cost, which in turn necessitates the use of special facilities to operate such systems. These shortcomings also narrow the range of individuals and businesses that can use the data system. Given these factors, it can be said that the improvement and development of new types of multi-channel optoelectronic systems is relevant.

Object of study. The process of forming a digital image in a multi-channel opto-electronic surveillance system.

Subject of study. Intelligent camera for unmanned aerial vehicle.

Goal. Develop a model of intelligent, small-size multi-channel surveillance system for use with unmanned aerial vehicles.

To achieve this goal, the following tasks are solved:

- An overview of existing multi-channel surveillance systems and intelligent systems for unmanned aerial vehicles has been made.
- Complete set selection for multichannel system layout.
- Image formation in a multi-channel optical-electronic system is investigated.
- Engineering calculations performed.
- A startup project for a company producing multichannel systems has been developed.

Publications:

1. Special instrument: state and prospects, collection of scientific papers of the third Ukrainian scientific and technical conference. The state-owned enterprise of the special instrument maker "Arsenal". Review of distortion calibration.
2. 20th International Conference of Young Scientists on Optics and High-Tech Materials - SPO 2019. Image stitching in unnamed air vehicle.
3. XII nationwide scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Look into the future of instrument making", a collection of papers of conferences. Using correlation filters to support the UAV.
4. VII International Conference of Optoelectronic Information Technologies Photonics-ODS 2018, conference abstract. A review on image stitching.
5. XIV nationwide scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists "Efficiency of engineering decisions in instrument making", proceedings of the conference. Efficiency of calibration of distortion in UAV vision systems.

Keywords: Image stitching, panoramas, UAVs, intelligent systems.

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ.....	15
1.1. Огляд існуючих багатоканальних систем.....	15
1.1.1. Argus-is.....	15
1.1.2. Boomerang Drone Map.	16
1.1.3. Luftronix.	17
1.1.4. EverDrone.....	17
1.2. Огляд інтелектуальних систем для багатоканальних систем спостереження.	18
1.2.1. Навігація в лісі за допомогою глибокого навчання.	18
1.2.2. Neurala.....	19
1.3. Вибір компонентів для БОЕСС.	20
1.3.1. Огляд ПЗЗ-приймачів.	20
1.3.1.1. Sony IMX219.....	20
1.3.1.2. OmnyVision OV5647.....	22
1.3.1.3. Висновок до підрозділу.....	23
1.3.2. Вибір контролера.	23
1.3.2.1. Toshiba TC358746.	23
1.3.2.2. Cypress CX3	23
1.3.2.3. Висновок до підрозділу.....	24
1.3.3. Вибір радіо передавача.....	24
1.3.3.1. Symmetry electronics NRF24L01.....	24
1.3.3.2. Cypress CYW43907.	24
1.3.3.3. Висновок до підрозділу.....	25
1.3.4. Вибір міні комп'ютера.	25
1.3.4.1. Raspberry Pi 3 model B+.....	26
1.3.4.2. Odroid XU4.	27
1.3.4.3. NVIDIA Jetson TX2.....	29
1.3.4.4. Висновок до підрозділу.....	30

1.4. Висновок до розділу.	31
РОЗДІЛ 2. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ.	32
2.1. Фізико-математична модель формування сигналу на оптико- електронному блоці.	32
2.1.1. Дослідження впливу компонентів оптико-електронного тракту.	33
2.1.2. Фізико-математична модель оптико-електронного тракту.	34
2.2. Фізико-математична модель програмної обробки сигналу.	37
2.2.1. Математична модель калібрування камери.	37
2.2.1.1. Калібрування камери за допомогою лінійних періодичних структур.	39
2.2.1.2. Калібрування камери за допомогою концентричних кіл.	40
2.2.2. Математична модель алгоритму визначення ключових точок на зображенні.	41
2.2.2.1. Орієнтований FAST та поворотний BRIEF (ORB).	42
2.2.2.2. Масштабне незалежне перетворення ознак.	43
2.2.2.3. Гістограма направлених градієнтів (HOG).	44
2.2.3. Математична модель співставлення ключових точок.	46
2.2.3.1. Співставлення грубою силою.	47
2.2.3.2. Співставлення за допомогою методу k-найближчих сусідів.	47
2.2.4. Математична модель вирівнювання та склейки зображень.	48
2.2.5. Вирівнювання кольірних балансів на зображеннях.	50
2.3. Висновки до розділу.	50
РОЗДІЛ 3. ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ.	52
3.1. Габаритний розрахунок.	52
3.2. Абераційний аналіз.	54
3.3. Енергетичний розрахунок.	57
3.3.1. Розрахунок спектрального потоку.	58
3.3.2. Розрахунок пропускання атмосфери.	60

3.3.3. Розрахунок пропускання системи.	62
3.3.4. Розрахунок відношення сигнал шум.	65
3.4. Висновок до розділу.	66
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ.	68
Розділ 5. Розробка стартап проекту «Багатоканальна оптико-електронна система спостереження».....	70
5.1 Опис ідеї проекту	70
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	73
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	75
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	84
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	87
5.6 Висновки	92
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	96

Перелік скорочень

БОЕСС – багатоканальна оптико-електронна система спостереження.

БПЛА – безпілотний літальний апарат.

ОПФ – оптична передавальна функція.

МПФ – модуляційна передавальна функція.

ФПФ – фазова передавальна функція.

ОС – оптична система.

ВСТУП

Багатоканальні оптико-електронні системи спостереження набувають широко розповсюдження та стрімкого розвитку. В основному дані системи використовують для спостереження за великими територіями або для отримання панорамних або картографічних знімків поверхні землі. Використання даних систем з безпілотними літальними апаратами дає велику кількість переваг, насамперед швидке отримання якісних знімків без використання людей, миттєве реагування в екстрених ситуаціях можливість дослідження важкодоступних територій.

Основною ідеєю даної системи є отримання зображень з кількох камер, які перекривають поля зору один одної. Далі ці зображення за рахунок цифрової обробки склеюють в одне ціле. Це дозволяє отримувати зображення з великими полями зору більшими за 180° , в окремих складних системах створюється поле зору 360° . При цьому на відміну від ширококутних об'єктивів зберігається якість по всьому полю і відсутній ефект риб'ячого ока.

З розвитком технологій, до даних систем стало більше уваги зі сторони аграріїв, яким потрібно регулярно оцінювати стан полів за допомогою цифрового оптичного каналу. Для даних задач аграрії часто використовують звичайні камери для отримання великої кількості знімків і подальшої склейки в одну велику карту. Однак для отримання якісних склейок зображень необхідно облітати територію з великим перекриттям поля зору камери. Використання технології БОЕСС дозволило пришвидшити виконання цих операцій за рахунок того що БОЕСС дає якісні зображення зі значно більшими полями зору, що дозволить значно зменшити довжину траєкторії польоту БПЛА зі збереженням, а в окремих випадках з покращенням якості знімків. Також дані системи цікаві для виробників роботизованих систем, які використовують оптичні канали для навігації. Використання багатоканальних систем спостереження дозволяє отримувати знімки з великим полем зору без

втрати якості та проекційних спотворень. Це в свою чергу покращує роботи певних алгоритмів комп'ютерного зору.

Більшість БОЕСС мають доволі великі габарити та значний цінник, що сповільнює вихід таких систем на широкий ринок. Тому основною задачею даної дисертації є розробка компактної та дешевої багатоканальної системи спостереження. В ході аналізу наявних систем та потреб ринку було вирішено розробити багатфункціональну, модульну систему спостереження, яка буде приставлена в двох варіаціях:

- для використання з БПЛА, з модулем обробки та передачі даних на борту.
- для вистрілу з 40 калібру, з модулем передачі даних і парашутом.

В цих двох варіантах буде спільний базовий модуль камер з процесором для зчитування зображень і подальшої передачі по шині. Цей модуль буде кріпитись до одного із двох модулів обробки.

Перший модуль буде представлений у вигляді блоку склейки зображень, блоку шифрування, блоку збереження зображень, та блоку передачі зображень. Даний варіант може бути використаний при зйомці з БПЛА, при польоті одночасно робляться знімки зі всіх камер, які передаються в блок обробки, де вони оброблюються, та додаються дані телеметрії (кути БПЛА, координати GPS, висота та інші в момент зйомки) потім ці дані шифруються і зберігаються в пам'яті або передаються на землю, в залежності від потреб.

Другий модуль буде представлений в якості блоку передачі даних і парашута, який буде слугувати для повільного спуску камери при вистрілі з 40 калібру, при цьому одночасно будуть робитись знімки зі всіх камер і передаватись на землю за допомогою радіо передавача. Склейка та накладання зображень буде проводитись з наземної станції у вигляді планшета. В даній реалізації система буде корисна для розвідки і військових, для швидкого отримання зображень території проведення операцій та ворожих території.

Більшість існуючих систем мають додатковий функціонал у вигляді інтелектуальних систем, таких як:

- Автоматичне виявлення та супровід цілей.
- Виявлення аномалій на знімках.
- Сегментування знімків.
- Семантичний аналіз знімків.
- Візуальне визначення положення.

Тому для подальшого розвитку і просування даної системи необхідно додавати інтелектуальну обробку.

Отже, в даній магістерській дисертації буде розроблено модульну, багатофункціональну багатоканальну оптико-електронну систему спостереження. Перевагами даної системи буде унікальна модульна конструкції з малими габаритами. Також за рахунок особливостей системи вона буде значно дешевшою за аналоги. Для подальшого вдосконалення системи розглядається додавання додаткового інтелектуального функціоналу.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ.

1.1. Огляд існуючих багатоканальних систем.

В даному підрозділі буде розглянуто та проаналізовано наявні на ринку багатоканальні системи. Більшість цих систем є військовими розробками. В ході цього розгляду буде проаналізовано основні характеристики та особливості даних систем.

1.1.1. Argus-is.

ARGUS-IS це системи обробки зображень у повному обсязі в режимі реального часу, що дозволяє створювати гігапісельні фотографії місцевості[1]. Дана система є проектом Управління перспективних дослідницьких проектів Міністерства оборони США (DARPA).

Головною ідеєю даної камери є використання великої кількості камер в одному блоці, при цьому ці камери мають поля зору, що частково перекриваються. Відповідно отримуючи знімки одночасно з усіх камер можна застосувавши склейку зображень, отримати знімок з надвисоким розділенням.



Рисунок 1.1. Загальний вигляд блоку Argus-is [1].

Даний пристрій зазвичай встановлюється на літальні апарати або на БПЛА. Під час польоту даний знімок робить сотні таких склейок, при цьому склейки можна об'єднати в більші склейки для створення фото карти місцевості.

В останній модифікації дана система дає відео з розширенням одного кадру 1.8 гігапікселя. Для цього використовується 358 камер з розширенням 5 мегапікселів[1]. Також для аналізу отриманого відео на наземній станції є інтелектуальна програма для супроводу об'єктів та аналізу їх переміщень.



Рисунок 1.2. Приклад зображення отриманого за допомогою Argus-is [1].

1.1.2. Boomerang Drone Map.

Boomerang Drone Map - камера для отримання карт місцевості за допомогою БПЛА[2]. Представляє собою багатоканальну систему в якій поєднані звичайні камери і сенсор глибини в результаті чого отримуються зображення та карта глибини. В результаті роботи даної системи отримуються об'ємні карти поверхні.

Для роботи даної системи необхідно за допомогою наземної станції задати територію над якою буде пролітати БПЛА. Після чого автоматично створюється маршрут при цьому враховується щоб було забезпечено достатнє перекривання поля зору камери Відповідно пролітаючи по маршруту безпілотник робить безліч фото і для кожного фото відповідно отримується

карти глибини. Застосовуючи до цих даних спеціальні алгоритми машинного зору, можна отримати об'ємні карти місцевості.

1.1.3. Luftronix.

Luftronix – українська компанія, що представила унікальну автоматичну систему для створення 3Д моделей літаків[3]. Суть роботи системи закладається в обльоті безпілотником літка та отриманні з однієї точки при різному освітленні декількох зображення літака з усіх ракурсів. Далі за допомогою відомих алгоритмів[4][5] отримується 3Д модель літка або його частини і порівнюється з відомим шаблоном або аналізується оператором. Особливістю даної системи є застосування оптичної навігації. Для цього перед обльотом апарат з даною системою калібрується в ангарі, в результаті цього отримується карта ангару. Відповідно маючи цю карту дрон здатен точно орієнтуватися в ангарі, та безпечно літати навколо навколо літака, що є обов'язковою умовою отримання якісної 3Д моделі.

1.1.4. EverDrone.

EverDrone це багатоканальна система для оптичної навігації БПЛА. Вона представляється у вигляді набору з камер, що розташовуються по колу. При цьому сумарне поле зору складає 360 градусів. Кожна камера представляє з себе складну систему, та включає звичайну RGB камеру та датчик глиби, що складається з двох інфрачервоних камер та інфрачервоного прожектора[6].

Дана система реалізує великий клас задач для автономного польоту безпілотним літальним апаратом. Завдяки наявності сенсора глибину камера дозволяє створювати глибинні карти для навігації та обминання перешкод. Також на базі даної системи реалізується оптична навігація за допомогою оптичного потоку. Це дозволяє не використовувати GPS під час польоту. Ще однією важливою функцією є точна посадка на маркер, яка може використовуватись для посадки дрона в зарядний бокс чи посадки на рухому платформу.



Рисунок 1.3. Система EverDrone.

1.2. Огляд інтелектуальних систем для багатоканальних систем спостереження.

В даному підрозділі буде зроблено огляд існуючих реалізацій інтелектуальних алгоритмів. Використання аналогів даних алгоритмів дасть значну перевагу над іншими системами та покращить привабливість для потенційних покупців. Даний огляд допоможе отримати загальне поняття існуючих алгоритмів. Також буде проведено дослідження за допомогою яких алгоритмів реалізовані дані системи.

1.2.1. Навігація в лісі за допомогою глибокого навчання.

Даний метод описаний групою авторів в IEEE Robotics and Automation[7]. Авторами було розроблено інтелектуальний алгоритм для навігації та ухиляння від БПЛА в лісному середовищі. В перших роботах даний метод орієнтувався на виділенні контурів лісових доріг та стежок, за допомогою методів бінаризації та контрастних переходів. Проте даний підхід не давав необхідних результатів та був чутливий до закінчення стежки. Відповідно був розроблений метод, який базується на глибоких нейромережах. Для цього авторами було зібрано близько 20 тисяч зображень для навчання та створено 10 шарову нейромережу з 150 тисячами параметрів.

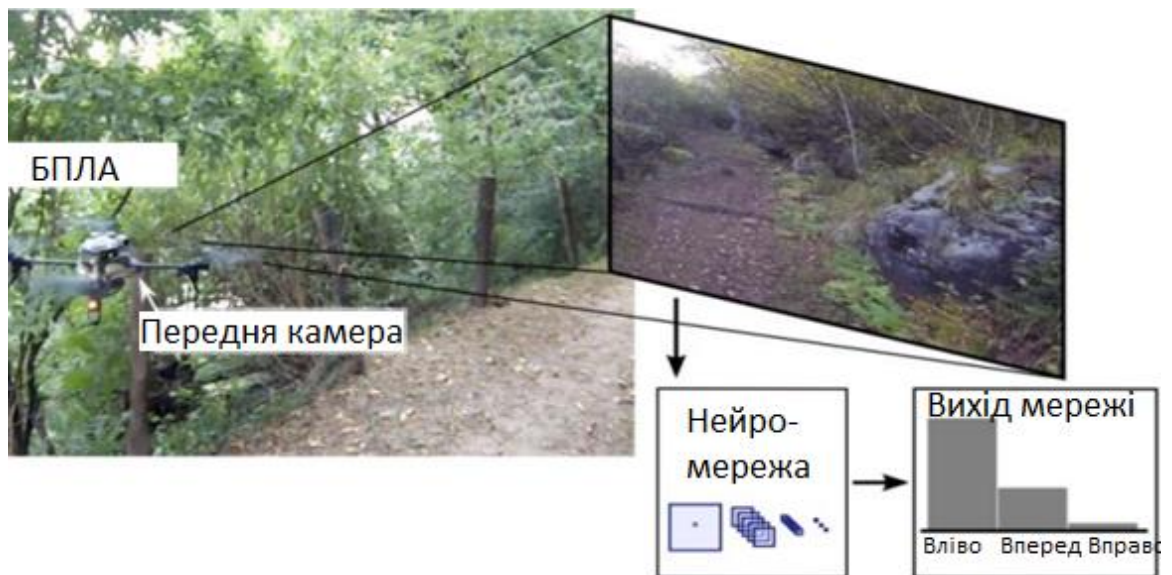


Рисунок. 1.4. демонстрація роботи нейромережі[7].

В результаті навчання авторами було отримано класифікатор який доволі точно дозволяв оминати перешкоди та пересуватися в лісовій місцевості. Точність роботи порівняльна з точністю реакції людини, та складає приблизно 85 – 95% в залежності від типу класифікатора та середовища. Даний метод був розроблений в академічних цілях тому вирішує тільки задачу навігації в лісі, проте буде не робочим в іншій місцевості особливо в рівномірній без перешкод.

1.2.2. Neurala.

Американський стартап, який отримав грант від NASA в розмірі 250000\$, та зібрав 2 мільйони доларів інвестицій[8]. В даному стартапі реалізувалась ідея автоматичного слідування за ціллю. Дана технологія була реалізована з використанням глибоких нейромереж. Ця камера має свій SDK, що дозволяє використовувати цю функції для захвату та супроводу різноманітних об'єктів, наприклад слідування за ворожою технікою, чи пересування за розвідувальною групою для зйомки місцевості.

Використання цієї системи з БОЕСС дозволила б спростити процес супроводу в умовах коли об'єкт швидко пересувається і є висока ймовірність втрати об'єкта за рахунок виходу його з поля зору камери.

1.3. Вибір компонентів для БОЕСС.

В даному підрозділі буде розглянуто та проаналізовано доступні на ринку компоненти які необхідні для багатоканальної оптико-електронної системи спостереження. Серед основних компонентів можна виділити:

- Камери.
- Контролер для зчитування зображення з камери.
- Радіо передач.
- Міні комп'ютер для обробки зображень на борту.

Серед основних характеристик які пред'являються до компонентів є якість, малі габарити, ціна.

1.3.1. Огляд ПЗЗ-приймачів.

Вибір камери є важливим етапом для подальшої розробки багатоканальної оптико-електронної системи спостереження, адже камера є базовим компонентом для всієї системи. Вибір камери можна розділити на 2 етапи:

- Вибір ПЗЗ-матриці
- Підбір об'єктива.

В даному підрозділі буде розглянуто декілька варіантів ПЗЗ-матриць, які підходять для даної системи. Серед основних вимог, що виставляються до матриці є якість отриманого зображення, мінімальні габарити, розширення не менше 1280x720 пікселів, доступна ціна, легкість поставок. Також необхідно розглянути як дані передаються від камери і можливі шляхи підключення до контролера.

1.3.1.1. Sony IMX219

Популярний сенсор від компанії Sony. Має 8 мега піксельний CMOS сенсор з максимальним розширенням фото 3280x2464, та 1920x1080 з частотою 30 кадрів на секунду для відео. Дана матриця є широко розповсюдженою серед виробників товарів для робототехніки, наприклад

стандартна камера для плат Raspberry Pi поставляється саме з цим сенсором. Завдяки цьому даний сенсор має гарну інформаційну базу[9].



Рисунок 1.5. Модуль ПЗЗ приймача Sony IMX219 з об'єктивом [9].

При цьому при правильній настройці, з використанням якісної оптики та попередньому каліброванні сенсор видає доволі якісні зображення. Даний сенсор видає зображення по інтерфейсу CSI-2. Також додатковою лінією йде I2C шина для настройки сенсора.

Таблиця 1.1. Технічні характеристики сенсора Sony IMX219 [9].

Затвор	Послідовний
Діагональ зображення	1/4.0 дюйма
Кількість активних пікселів	3280x2464 (8 мегапікселів)
Розмір матриці	1.12x1.12 мм
Матеріал	Кремній
Глибина кольору	10-бітний аналоговий перетворювач на чіпі
Максимальна частота кадрів	30 кадрів/с

Швидкість передачі даних	До 755 Мбіт/секунду на лінію (при 4 лінійному режимі) та 912 Мбіт/ секунду на лінію (при 2 лінійному режимі).
Розміри	6.5 x 6.5 x 0.5 мм.

1.3.1.2. OmnyVision OV5647.

OV5647 це 5 мегапіксельна CMOS ПЗЗ матриця від компанії OmnyVision з низьким споживанням та високої потужністю. Дана камера має максимальне розширення для фото 2592x1944, та здатна знімати відео в форматі 1080p з частотою 30 кадрів/секунду[10]. Ця матриця за рахунок своїх характеристик здобула широке розповсюдження на ринкові, використовувалась як матриця для першої моделі камер від Raspberry Pi.

Серед переваг даної камери можна виділити гарну інформаційну базу, широку користувацьку підтримку. Головним недоліком є, що дана матриця була знята з виробництва, хоча ще на складах є запаси даного сенсора, проте для довгострокової підтримки на нього не варто розраховувати.

Таблиця 1.2. Технічні характеристики сенсора OmniVision OV5647[10].

Затвор	Послідовний
Діагональ зображення	1/4.0 дюйма
Кількість активних пікселів	2592 x 1944 (5 мегапікселів)
Розмір матриці	1.4 x 1.4 мм
Матеріал	Кремній
Глибина кольору	8/10-бітний аналоговий перетворювач на чіпі
Максимальна частота кадрів	30 кадрів/с
Розміри	6.95 x 6.7 x 0.5 мм

1.3.1.3. Висновок до підрозділу.

Розглянувши різні варіанти можна зробити висновок, що ПЗЗ-матриця від Sony підійде для задач поставлених в цій роботі. Дана матриця має компактні габарити, є широкодоступною на ринку, має відносно низьку ціну та широку підтримку. Також дана матриця має гарну якість зображень і високу роздільну здатність, що дозволить покращувати прилад в майбутньому. Ще однією ключовою перевагою є використання високошвидкісного інтерфейса, що дозволить отримувати зображення з мінімальною затримкою. Інші моделі мають гірші характеристики по цим параметрам.

1.3.2. Вибір контролера.

Контролер необхідний для зчитування даних з ПЗЗ-матриці та подальшої передачі на міні комп'ютер або передавач. Оскільки було обрано матрицю з інтерфейсом CSI-2 необхідно використовувати контролер які підтримує даний протокол. Основними критеріями до контролера є: компактні габарити, низька ціна, підтримка CSI-2.

1.3.2.1. Toshiba TC358746.

Toshiba TC358746 є мостовим перетворювачем з CSI-2 в паралельний порт. Даний контролер підтримує CSI-2 інтерфейс з 2 та 4 лініями даних з максимальною швидкість до 1 Гбіт на лінію. Підтримує формати даних: YUV422, YUV444, RGB888/666/565 та RAW8/10/12/14. Також має додаткові порти з GPIO виходами та I2C і SPI шиною. Має малі габарити 4.5 на 4.5 на 2 мм[11].

1.3.2.2. Cypress CX3

Cypress CX3 є перетворювачем CSI-2 сигналу в USB2.0/USB3.0 дані. Цей контролер підтримує CSI-2 інтерфейс з 2 та 4 лініями даних з максимальною швидкість до 1 Гбіт на лінію. Підтримує формати даних: YUV422, YUV444, RGB888/666/565 та RAW8/10/12/14. Перевагою цього контролера є наявність додаткового порту I2C за допомогою якого можна конфігурувати ПЗЗ

приймач. Також має додаткові порти з GPIO виходами там I2C, I2S, UART та SPI шиною. Має розміри 10 на 10 на 1.7 мм [12].

1.3.2.3. Висновок до підрозділу.

В результаті можна обрати Cypress CX3, який має більший функціонал за меншу ціну. Також про дану модель більше інформації та краща документація. Cypress CX3 має більші габаритні розміри за Toshiba TC358746, проте це не є критичною проблемою.

1.3.3. Вибір радіо передавача.

Передавач буде використовуватись для передачі даних в варіанті системи для вистрілу з 40 мм калібру. Процес роботи буде наступним, паралельно за допомогою процесора будуть зчитуватись і стискуватись дані з кожної камери і послідовно через мультиплексор будуть передаватись на приймач, який в свою чергу ці дані буде передавати на землю.

1.3.3.1. Symmetry electronics NRF24L01.

NRF24L01 це 2.4 ГГц радіо передавач, який застосовується для широкого спектру задач. Даний модуль представляється в версії з 8 бітним мікро процесором на одному кристалі. Даний пристрій підтримує USB 2.0 пристрої і має максимальну швидкість передачі до 2 Мбіт/с. Серед головних переваг можна виділити низьку ціну, компактні розміри: 5 x 5 x 0.4 мм, поєднання передавача і процесора на одному кристалі [13].

1.3.3.2. Cypress CYW43907.

Cypress CYW43907 з вбудованою бездротовою системою на мікросхемі (SoC) унікально підходить для програм Internet-of-Things (IoT). Він підтримує всі показники, визначені в специфікаціях IEEE 802.11 a / b / g / n. Пристрій включає додатки на основі Arm® Cortex® процесора, однопотоковий IEEE 802.11n MAC / базовий діапазон / радіо, дводіапазонний підсилювач потужності передачі 5 ГГц і 2,4 ГГц (ПА) та прийом підсилювача низького рівня шуму (LNA). Він також підтримує необов'язкове різноманіття антен для поліпшення робочих характеристик радіочастот у складних умовах [14].

CYW43907 - це оптимізований SoC, орієнтований на вбудовані програми IoT в промислових та медичний датчик, побутові прилади та вбудовані девайси. Даний пристрій має максимальну швидкість передачі до 50 Мбіт/секунду, та низьке споживання. Підтримує різні типи вхідних даних по протоколах: I2S, UART, USB2.0, SPI і тд. Має малі габарити 4.5 на 4.5 на 0.5 мм.

1.3.3.3. Висновок до підрозділу.

В даному підрозділі було розглянуто варіанти передавачів серед яких висока швидкодія, малі габарити, підтримка необхідного протоколу передачі даних, розширена документація. В порівняння з першим варіантом він має кращий процесор на борту та більшу швидкість передачі даних. Проте коштує втричі більше, проте це не є критичною проблемою і цей недолік не переважає переваги.

1.3.4. Вибір міні комп'ютера.

Для обчислювального модуля багатоканальної системи необхідно підібрати універсальний обчислювальний блок, який задовольняє наступним вимогам: низьке енергоспоживання, малі габарити, також бажана наявність великих обчислювальних ресурсів. Перші дві вимоги обумовлені цільовим використанням модуля: на борту БПЛА, для яких питання енергозбереження та вантажопідйомності є доволі критичними. Адже літальні апарати мають обмежене живлення, обумовлене наявними джерелами живлення (LiPo акумулятори, ДВС), також малогабаритні БПЛА зазвичай мають низьку підйомну масу. Остання вимога впливає з точки зору вдосконалення системи, хоча сама склейка зображення не є ресурсоємкою, проте додавання інтелектуального функціоналу вимагатиме цих ресурсів. . На ринку існує багато різноманітних варіантів мікрокомп'ютерів. Серед основних можна виділити: Raspberry Pi 3 model B+, Odroid XU4, NVIDIA Jetson TX2 та інші. Ці моделі мають довгострокову підтримку розробників, що виключає можливість зникнення з ринку, внаслідок чого в екстреному порядку необхідно буде

шукати заміну. Також ці моделі мають широке коло користувачів, це надає перелік різних готових застосунків, а також базу недоліків з можливими шляхами вирішення.

1.3.4.1. Raspberry Pi 3 model B+.

Raspberry Pi 3 (далі RPI3) одна із найвідоміших плат мікрокомп'ютерів в світі робототехніки. Вона має широку апаратну підтримку, що включає велику кількість сенсорів, камер, блоків вводу-виводу інформації. Також має широку програмну підтримку, наприклад власний Linux-дистрибутив Raspian, бібліотеку для роботи з камерою підключеною по CSI (Camera Standart Interface) – PiCamera [15].

Таблиця 1.3. Технічні характеристики Raspberry Pi 3[15].

Процесор	ARM Cortex-A53 Quad Core SoC 1.2 ГГц
Кількість оперативної пам'яті	1 Гб
GPIO	40-pin
Мережевий інтерфейс	10/100 Ethernet
Безпроводний інтерфейс	BCM43143, WiFi та Bluetooth Low Energy
Периферія	UART, SPI, I2C, USB 2.0, CSI
Живлення	5В / 2.4А
Габарити	85x56x17 мм
Ціна	50\$

Як видно із таблиці RPI3 має процесор ARM з частотою 1.2 ГГц, 1 Гб оперативної пам'яті [15]. З особливостей виділити наявність портів GPIO (General Port of Input Output), що дозволяє підключати різноманітні компоненти, такі як: серво-мотори, датчики, інерційні блоки. Також RPI3 має стандартний інтерфейс камери, що дозволяє підключати деякі промислові камери. Розглянувши даний мікрокомп'ютер можна зробити висновок, що цей екземпляр має хороший набір інтерфейсів, також має хорошу підтримку і є

не дорогим, при цьому має середні габарити. З недоліків можна виділи невисоку обчислювальну потужність, яка не дозволить використовувати деякі сучасні алгоритми комп'ютерного зору.



Рисунок 1.6. Вигляд Raspberry Pi 3 model B+[15].

1.3.4.2. Odroid XU4.

ODROID-XU4 від Hardkernel - високопродуктивний однопалатний комп'ютер компактних розмірів, який працює на базі 8-ядерного ARM мікропроцесора Exynos5422 від Samsung, зробленого по технології big.LITTLE та включає в себе чотири ядра ARM Cortex-A15 з частотою 2GHz і чотири ядра ARM Cortex-A7 з частотою 1.4GHz.

Таблиця 1.4. Технічні характеристики Odroid XU4 [16].

Процесор	Exynos5422, ARM Cortex-A15 – 2ГГц, ARM Cortex-A7 - 1.4ГГц
Графічний процесор	Mali-T628 MP6
Кількість оперативної пам'яті	1 Гб
GPIO	30+12-pin
Мережевий інтерфейс	Gigabit Ethernet, WiFi

Периферія	UART, SPI, I2C, USB 3.0
Живлення	5В / 4А
Габарити	82x55x22 мм
Ціна	100\$

Плата оснащена 2GB оперативної пам'яті LPDDR3 та графічним процесором Mali-T628 MP6. ODROID-XU4 має 1Gbps Ethernet, 2 x USB 3.0 Host, 1 x USB 2.0 Host, слотом для eMMC модуля, слотом для microSD карт. Odroid XU4 здатен працювати під управлінням Linux або Android OS [16].

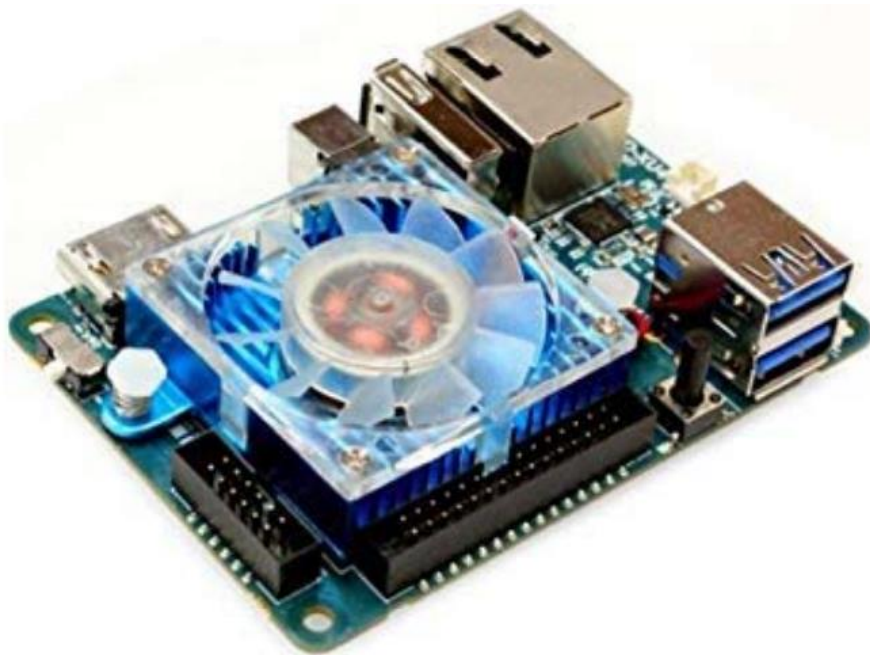


Рисунок 1.7. Вигляд Odroid XU4[16].

Odroid XU4 має значно потужніший в порівнянні з Raspberry Pi 3 B+ процесор та графічний підпроцесор. Також має 2 ГБ оперативної пам'яті та USB 3.0 і Gigabit Ethernet, що дозволяє підключати камери високого розділення. З мінусів можна виділити відсутність Camera Standard Interface, що обмежує вибір камер. За габаритами приблизно такий як Raspberry Pi 3 model B+. Проте в 2 рази більше коштує. Продуктивність даного мікрокомп'ютера дозволяє впроваджувати більш складніші алгоритми комп'ютерного зору, проте не має достатньо ресурсів для запуску нейромереж.

1.3.4.3. NVIDIA Jetson TX2.

В 2015 році компанія NVIDIA представила новий суперкомп'ютер NVIDIA Jetson TX1, який призначений для використання в БПЛА, різноманітних роботах та смарт електроніці. Після успіху з TX1, NVIDIA випустила наступника - NVIDIA Jetson TX2, який став вдвічі потужнішим за попередника. TX1 і TX2 представляються як мікрокомп'ютер для штучного інтелекту. TX2 був обладнаний графічною картою на архітектурі NVIDIA з 256 ядрами, це дозволяє використовувати для розгортання нейромереж. Також TX2 обладнаний двома процесорами – Denver 2 та чотирьох ядерним CortexA57. Також має 8 ГБ оперативної пам'яті. При всьому цьому NVIDIA Jetson TX2 по габаритам зрівнюється з кредитною картою та потребує потужності живлення всього 7.5 Ватт[17].

Таблиця 1.5. Технічні характеристики Jetson TX2.

Процесор	HMP Dual Denver 2, Quad ARM® A57
Графічний процесор	NVIDIA Pascal™, 256 CUDA cores
Кількість оперативної пам'яті	8 Гб
GPIO	40-pin
Мережевий інтерфейс	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth
Периферія	CAN, UART, SPI, I2C, I2S, CSI, USB 3.0, USB 2.0, DSI, P 1.2, HDMI 2.0, eDP 1.4
Живлення	5B / 4A
Габарити	87x50x24 мм
Ціна	399\$

Як видно дана модель оснащення графічною картою з підтримкою CUDA, що дозволяє переносити розрахунки для нейромережі з процесора на відеокарту, що значно підвищує швидкодію. Це дозволить використовувати

мережі на відомих архітектурах, наприклад SSD, YOLO, R-CNN. Ще одна з причин чому цей міні-комп'ютер ідеально підходить для нейромереж. це швидка оперативна пам'ять, яка дозволяє обмінюватись даними зі швидкістю 58,4 ГБ/с. Однією з особливостей даного модуля є можливість підключення одночасно 6 камер по 12 лініям інтерфейсу CSI з пропускнуою здатністю 2,5 Гбіт/с для кожної лінії.

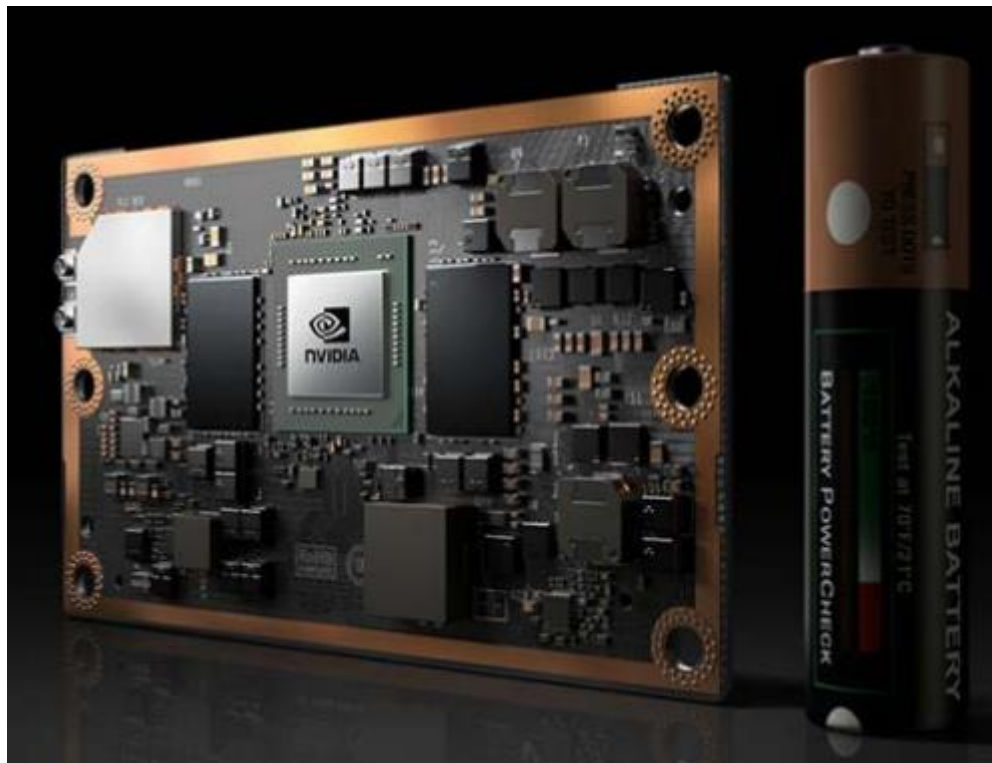


Рисунок 1.8. Зображення Nvidia Jetson TX2 [17].

1.3.4.4. Висновок до підрозділу.

В даному підрозділі було розглянуто мікрокомп'ютери для багатоканальної системи спостереження, як можна з розуміти з даного огляду на ринку є багато рішень в цьому напрямкові. Тому для вибору необхідно чітко сформулювати параметри по яким буде обиратись комп'ютер. Всі комп'ютери, що представленні в даному підрозділі підійдуть для базового функціоналу, а саме склейки зображень. Проте для додавання нового функціоналу, такого як супровід об'єктів чи розгортання нейромережі, необхідно використовувати потужний комп'ютер, такий як NVIDIA Jetson TX2. Тому даний комп'ютер буде ідеальним варіантом з огляду на майбутнє.

На початкових етапах можна використовувати Raspberry чи Odroid оскільки вони більш дешевші.

1.4. Висновок до розділу.

В даному розділі було зроблено обширений огляд літератури по темі багатоканальних оптико-електронних систем спостереження для склейки зображень. Відповідно було розглянуто аналоги таких систем, які широко використовуються у світі. Також було розглянуто додатковий функціонал, що представляється для систем даного класу. Також було проведено огляд компонентної бази для майбутнього виробництва системи.

Розглянувши цю інформацію, можна зробити висновки, що багатоканальні системи є актуальними в світі і потребують дешевших но якісніших варіантів. Також однією з обов'язкових умов для розширення мережі клієнтів і виходу на глобальний рівень є наявність додаткового функціоналу, наприклад супроводу об'єктів в полі зору систему, чи розсортування нейромережі для різноманітних цілей.

Ще одним ключовим моментом в даному розділі є огляд матеріально-компонентної бази елементів. Під час цього огляду було вибрано оптимальні компоненти для наступного використання в проектуванні дослідного екземпляра системи. Також можна зробити висновок, що на ринку є аналоги даних компонентів, що в свою чергу мінімізує ризики від залежності від одного постачальника.

РОЗДІЛ 2. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ.

В цьому розділі буде розроблено фізико-математичну модель БОЕСС. Для розробки фізико-математичної моделі необхідно дослідити які процеси відбуваються під час проходження сигналу через систему. Серед основних перетворень в системі можна виділити два основні етапи:

- Проходження оптичного сигналу через оптику та формування електричного сигналу на ПЗЗ-приймачі.
- Програмна обробка сигналу та об'єднання каналів за допомогою склейки зображень.

Кожен із цих етапів складається з декількох підпунктів. Тому для формування повної фізико-математичної моделі багатоканальної оптико-електронної системи спостереження необхідно розглянути кожен із цих етапів окремо.

2.1. Фізико-математична модель формування сигналу на оптико-електронному блоці.

Першим етапом в багатоканальній оптико-електронній системі спостереження є формування сигналу. Під час цього процесу сигнал зазнає декілька видів трансформацій:

- Трансформування сигналу в оптичному тракті.
- Перетворення сигналу з оптичного на електронний на ПЗЗ-матриці.
- Цифрове фільтрування на процесорі.
- Подальша обробка на мікро комп'ютері.

В цьому підрозділі буде розглянуто фізико-математичну модель перетворення сигналу підчас перших трьох етапів. Для цього необхідно розглянути трансформації на кожному компоненті оптико-електронного тракту.

2.1.1. Дослідження впливу компонентів оптико-електронного тракту.

Першим компонентом який трансформує сигнал є оптика. Оптика представляється фільтром низьких частот, за рахунок диференційних обмежень та геометричних аберацій. Оптика розглядається як дифракційно обмежена система з круглою апертурою. Однією з основних характеристик оптичної системи є оптична передавальна функція. ОПФ – це критерій, який демонструє, як оптична система відтворює різні просторові частоти. Математично оптична передавальна функція є результатом Фурє-перетворення. Функції розсіювання точки.

Ще однією характеристикою є модуль ОПФ, який називається модуляційна передавальна функція. Цей параметр демонструє, як оптична система передає різні просторові частоти. Наступною характеристикою є аргумент ОПФ, який називається фазова передавальна функція. ФПФ демонструє, як ОС впливає на початкові фази гармонік. Для систем, що мають осесиметричну аберацію, ФПФ дорівнює нулю [18].

Наступним компонентом, що вносить трансформації в сигнал є ПЗЗ-матриця. За рахунок інтегрування сигналу по всій площі матриці вона є фільтром низьких частот. Також, за рахунок дискретності матриці, вона виконує просторову вибірку. ПЗЗ-матриця перетворює оптичний сигнал в електричний[19].

Після отримання електричного сигналу, його потрібно відновити. Тобто компенсувати втрати інформації на ПЗЗ-матриці. Це виконується програмою, за рахунок цифрового фільтра.

Ще одним блоком є абстрактний блок відновлення. Він представлений інтерполятором, який трансформує вихідний двохвимірний електричний сигнал в аналоговий. Використовується для спрощення математичного апарату. Після цього ми отримуємо аналоговий сигнал на вході і на виході.

2.1.2. Фізико-математична модель оптико-електронного тракту.

Трансформацію сигналу можна вивчати в області просторових координат та просторових частот. Трансформацію сигналу краще досліджувати в області просторових частот за рахунок перемноження спектрів за допомогою Фур'є перетворення. При використанні просторових координат для аналізу необхідно використовувати двовимірні згортки, для яких необхідно більше обчислювальних ресурсів, ніж для Фур'є перетворення.

Розрахунок трансформацій сигналу може проводитись, як для площини об'єктів, так і для площини зображення. Зручніше працювати з сигналом в площині об'єктів, тому далі буде розглядатись сигнал в площині об'єктів.

Також сигнал може бути представлений у двох варіаціях: детермінованим або стохастичним. Детермінований сигнал представляється розподіл випромінювання в полі зору, або його Фур'є перетворенням, що відображає просторовий спектр сигналу. Стохастичний сигнал може бути представлений статистичними функціями, такими як автокореляційна функція, або спектром густини, що отримується за рахунок Фур'є перетворення автокореляційної функції [20].

Важливим допущенням є те, що всі елементи оптико-електронного тракту представляються лінійними просторовими фільтрами. Завдяки цьому припущенню спрощується математична модель. Ця умова виконується, при невеликому спотворенню сигналу на ПЗЗ матриці та малій нелінійності електричних елементів.

Розглянемо трансформації сигналу в області просторових частот детермінованого сигналу в площині об'єкта. Розподіл сигналу на виході системи характеризується спектром вихідного сигналу:

$$S(\nu_x, \nu_y) = k \cdot L(\nu_x, \nu_y) \cdot H_O(\nu_x, \nu_y) \cdot H_D(\nu_x, \nu_y) \cdot H_F(\nu_x, \nu_y) \cdot H_R(\nu_x, \nu_y) \quad (2.1)$$

де ν_x, ν_y - просторові частоти в площині об'єктів; $L(\nu_x, \nu_y)$ - розподіл яскравості в площині об'єкту; $H_O(\nu_x, \nu_y)$, $H_D(\nu_x, \nu_y)$, $H_F(\nu_x, \nu_y)$, $H_R(\nu_x, \nu_y)$ - передавальні функції оптики, приймача, фільтра та відновлювача відповідно.

Передавальні функції розраховуються відповідно до формул [22]:

$$H_o(v_x, v_y) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arccos\left(\frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{v_o}\right) - \left(\frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{v_o}\right) \cdot \sqrt{1 - \frac{v_x^2 + v_y^2}{v_o^2}} \right), & (v_x^2 + v_y^2) < v_o^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$H_D(v_x, v_y) = \frac{\sin\left(\pi \cdot \frac{x_E}{\beta} v_x\right)}{\pi \cdot \frac{x_E}{\beta} v_x} \cdot \frac{\sin\left(\pi \cdot \frac{y_E}{\beta} v_y\right)}{\pi \cdot \frac{y_E}{\beta} v_y} = \text{sinc}\left(\pi \cdot \frac{x_E}{\beta} v_x\right) \cdot \text{sinc}\left(\pi \cdot \frac{y_E}{\beta} v_y\right) \quad (2.3)$$

$$= k_F \sum_{n_x=-N_x}^{N_x} \sum_{n_y=-N_y}^{N_y} h_{x,y} \cdot \exp\left(-\pi \cdot j \left(n_x \cdot \frac{v_x}{v_{nx}} + n_y \cdot \frac{v_y}{v_{ny}} \right)\right) \quad (2.4)$$

$$H_R(v_x, v_y) = \begin{cases} 1, & |v_x| \leq \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{\Delta x}{\beta}\right)} = v_{nx}, \\ & |v_y| \leq \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{\Delta y}{\beta}\right)} = v_{ny} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

де $\beta, \Delta x, \Delta y, x_E, y_E$ - лінійне збільшення оптики, розміри та просторовий період світлочутливих областей по осі X і Y відповідно; $k_F, h_{x,y}$ - імпульсний відгук цифрового фільтра, що є матрицею коефіцієнтів фільтра і константа для нормалізації, відповідно; v_o, v_{nx}, v_{ny} - оптична частота зрізу, яка визначає пропускну здатність оптичної система, і її можна розрахувати, використовуючи формулу Аббе, частоти Найквіста, які задають межі смуги пропускання матриці приймачів як двомірної структури в площині об'єктів, відповідно:

$$v_o = \frac{2 \cdot NA}{\lambda} = \frac{1}{d_{\min}}; d_{\min} = \frac{\lambda}{2 \cdot NA};$$

$$v_{nx} = \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{k_F \cdot \Delta x}{\beta} \right)} = \frac{\beta}{2 \cdot k_F \cdot \Delta x}; v_{ny} = \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{k_F \cdot \Delta y}{\beta} \right)} = \frac{\beta}{2 \cdot k_F \cdot \Delta y} \quad (2.6)$$

Аналогічно можна виразити вихідний розподіл сигналу в області просторових координат:

$$S(t) = k \cdot L \left(\frac{t - t_n}{V' \cos(\varphi)}, \frac{t - t_n}{V' \sin(\varphi)} \right) * h_o(x, y) * h_D(x, y) * h_F(x, y) * h_R(x, y) \quad (2.7)$$

де x, y - просторові координати, $L \left(\frac{t - t_n}{V' \cos(\varphi)}, \frac{t - t_n}{V' \sin(\varphi)} \right)$ - просторовий спектр розподілу яскравості в площині об'єктів, $h_o(x, y)$ - передавальна функція оптики, $h_D(x, y)$ - передавальна функція приймача, $h_F(x, y)$ - передавальна функція цифрового фільтра, $h_R(x, y)$ - передавальна функція відновлювача.

Передавальні функції розраховуються аналогічно до формул 2.2-2.5. Розрахунок відклику систему на вхідний сигнал для стохастичного сигналу в області просторових частот визначається як автокореляційна функція вхідного випадкового сигналу площини об'єкта та функції густини просторової потужності вихідного двовірного випадкового сигналу.

$$r'(t) = k * r \left(\frac{\Delta t}{V' \cdot \cos(\varphi)}, \frac{\Delta t}{V' \cdot \sin(\varphi)} \right) * (h_o(x, y) \circ h_o(x, y)) * (h_D(x, y) \circ h_D(x, y)) * (h_F(x, y) \circ h_F(x, y)) * (h_R(x, y) \circ h_R(x, y)) \quad (2.8)$$

де $r \left(\frac{\Delta t}{V' \cdot \cos(\varphi)}, \frac{\Delta t}{V' \cdot \sin(\varphi)} \right)$ - функція щільності просторової потужності в області просторових координат; \circ - символ комплексно-спряженого перемноження;

Аналогічно розраховується вихідний сигнал для області просторових частот:

$$G(f) = k * G\left(\frac{f}{V' \cdot \cos(\varphi)}, \frac{f}{V' \cdot \sin(\varphi)}\right) \cdot |H_O(v_x, v_y)|^2 \cdot |H_D(v_x, v_y)|^2 \cdot |H_F(v_x, v_y)|^2 \cdot |H_R(v_x, v_y)|^2 \quad (2.9)$$

де $G\left(\frac{f}{V' \cdot \cos(\varphi)}, \frac{f}{V' \cdot \sin(\varphi)}\right)$ - функція просторової щільності в області

просторових частот.

2.2. Фізико-математична модель програмної обробки сигналу.

В даному підрозділі буде розглянута фізико-математична модель обробки сигналу на виході з оптику-електронного блоку. Сигнал на виході представляється кольоровим зображенням в форматі RGB. Після отримання зображення до нього застосовується склейка зображення. Склейка зображення це складний алгоритм цифрової обробки зображень. Цей алгоритм складається з наступних етапів:

- Знаходження особливих точок на кожному зображенні.
- Співставлення точок.
- Вирівнювання та склейка зображень.
- Змішування зображень.

Також додатково необхідно виділити етап попередньої підготовки під назвою калібрування камери. Він проводиться одноразово, перед зйомкою зображень. Метою даного етапу є програмна компенсації недоліків об'єктиву і матриці. Наприклад наявність дисторсії об'єктиву камери. Кожен із цих етапів має власну математичну модель тому доцільно детально розглянути їх окремо.

2.2.1. Математична модель калібрування камери.

Для початку необхідно розглянути, що з математичної точки зору представляє собою цифрове зображення. Цифрове зображення це двохвимірна проекція трьохвимірного світу. Кожну точку трьохвиірного простору можна представити матрицею:

$$M = (X_0, Y_0, Z_0)^T \quad (2.10)$$

Також ми можемо знайти відповідну проекцію на однорідну площину, до цієї точки:

$$m = (x, y)^T \quad (2.11)$$

Відповідно ми можемо знайти співвідношення між цими точками, яке виражається формулою:

$$\lambda m = PM \quad (2.12)$$

де λ – це матриця масштабування, P – 3x4 проекційна матриця, яка може бути виражена формулою:

$$P = K[RT] \quad (2.13)$$

де K – внутрішня матриця параметрів, R – матриця трохвимірного обертання, T – матриця переміщення.

Відповідно маючи дані співвідношення ми можемо вивести математичну модель дисторсії. Вона представляється спотворенням, яке характеризується відхиленням від прямолінійності об'єктів з трохвимірної сцени на двохвимірну проекцію. Дисторсія є формою оптичної аберації, вона може бути представлена великою кількістю параметрів. Найчасіше дисторсія представляється в двох варіаціях: подушкоподібна і бочкоподібна, та змішуванням цих двох типів [22].

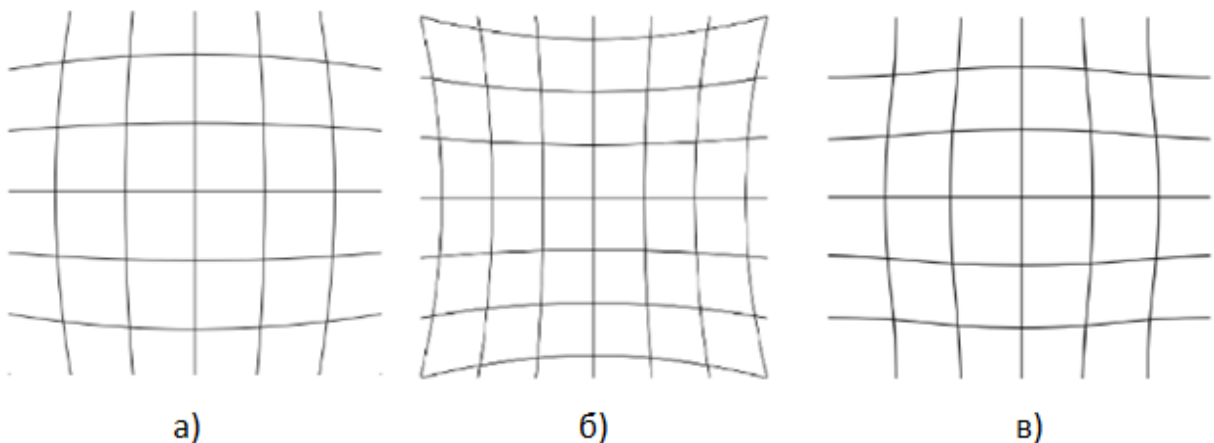


Рисунок 2.1. Приклади дисторсії: а) бочкова, б) подушкова, в) змішана.

Вплив дисторсії в оптичній системі на зображення можна виразити за допомогою формули:

$$\mathbf{m}_d = (x_d, y_d)^T \quad (2.14)$$

де \mathbf{m}_d – це [23]:

$$\mathbf{m}_d = \begin{bmatrix} f(r) \cdot x + 2 \cdot k_3 \cdot x \cdot y + k_4 (r^2 + 2 \cdot x^2) \\ f(r) \cdot y + 2 \cdot k_4 \cdot x \cdot y + k_3 (r^2 + 2 \cdot y^2) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

де $f(r) = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, k_i – коефіцієнт дисторсії.

Процес калібрування камери представляє з себе знаходження коефіцієнтів дисторсії. Можна виділити наступні типи калібрування камери:

- За допомогою періодичних лінійних структур.
- За допомогою концентричних кіл.
- Автокалібрування.

2.2.1.1. Калібрування камери за допомогою лінійних періодичних структур.

Процес калібрування камери за допомогою періодичних лінійних структур можна розділити на наступні чотири етапи[24]:

- Визначення точок кривих ліній.
- З'єднання точок кривих ліній.
- Оцінка викидів.
- Фінальна оцінка параметрів радіальної дисторсії та визначення коефіцієнтів дисторсії.

Перший етап обумовлений тим, що при отриманні зображення прямі лінії в трьохвимірному світі перетворюються на криві лінії на зображенні або лишаються прямими, при відсутності її. Відповідно для початку необхідно визначити точки, які належать кривим лініям з тестового патерну на зображенні. Особливістю даного методу є те, що алгоритм при визначенні точок

ліній відфільтровує короткі лінії як шумові, тому якщо використовувати короткі лінійні шаблони їх може бути не розпізнано тому, що алгоритм позначить їх як шум. Відповідно, необхідно використовувати довгі лінії на шаблоні.

Після визначення точок лінії, та фільтрації по довжині сегментів відбувається пошук точок, що належать до одної прямої. Це відбувається за рахунок визначення відстані між сусідніми точками та визначення їх напрямку. Також аналізується відстань між ймовірними точками з однієї лінії до ймовірних точок з іншої ліній, за рахунок цього точніше відбувається кластеризація точок по лініям.

Наступним етапом є визначення функції спотворення, за допомогою якої відбувається відновлення прямих ліній з зображення з дисторсією. Для цього з набору ліній, які представлені точками, вибирається одна випадкова лінія. Вона подається на вхід алгоритму RANSAC, якій відкидає помилкові включення точок. Далі обчислюється функція відновлення ліній, яка представляється коефіцієнтами дисторсії. Після чого цю функцію застосовують для всіх кривих ліній в наборі, якщо функція була підібрана правильно то на виході всі криві лінії з набору мають дати пряму. Якщо ця лінія не дала правильної функції відновлення, то випадково вибирається наступна лінія з набору і процедура повторюється для неї. Так алгоритм застосовується до кожної лінії, поки не буде знайдено правильну функцію відновлення.

Наприкінці виконується мінімізація функції втрат для всіх параметрів, що застосовуються для всіх ліній з набору.

2.2.1.2. Калібрування камери за допомогою концентричних кіл.

Цей метод передбачає використання концентричних кіл та маркера на осі X. Цей спосіб був вперше описаний Абатом Ф., Камахортом Е., Віво Р.[КОНЦ кол.]. Роботу алгоритму калібрування камери за допомогою концентричних кіл, можна розділити на наступні кроки [25]:

- Знаходження еліпсів.

- Знаходження істинного центра еліпсів та відновлення положення.
- Визначення функції відновлення.

Для початку за допомогою методів цифрової обробки зображень необхідно визначити де на зображенні знаходяться концентричні кільця та маркер на осі. Потім визначаються точки, які описують кільце для кожної точки. На виході ми отримуємо два набори точок, для кожного кільця і координати маркера.

Наступним кроком є пошук істинного центра двох концентричних кіл та просторові трансформації цих кіл. За рахунок проєкційних спотворень точка центру на зображень не збігається з реальним центром. Відповідна для правильної роботи алгоритму необхідно визначити істинний центр, це можна зробити за допомогою роботи Форсіч Д., Мунді та інших [26]. Також за рахунок проєкційних спотворень може змінюватись положення кілець, відповідно необхідно відновити істинне положення. Це робиться за рахунок маркера на осі X. Основною ідеєю є, що маркер лежить на осі X і співпадає з центром кіл на реальному шаблоні, відповідно на зображенні ця умова теж має дотримуватись. Відповідно якщо дана умова не виконується за допомогою матриць обертання та зміщення зображення вирівнюється та приводиться до правильного положення.

Після цього визначається функція відновлення, що представляє собою набір коефіцієнтів дисторсії.

2.2.2. Математична модель алгоритму визначення ключових точок на зображенні.

Існує два основних підходи до знаходження ключових точок на зображенні: прямий і заснований на знаходженні особливих точок. Перший метод заснований на прямому співставленні пікселів на одному та іншому зображенні. Другий метод передбачає використання методів які знаходять особливі точки за допомогою ліній, кутів, границь та інших геометричних та

колірних особливостях. Серед основних методів заснованих на даній методології можна виділити:

- Орієнтований FAST та поворотний BRIEF (ORB).
- Масштабно незалежне перетворення ознак (SIFT).
- Гістограма направлений градієнтів (HOG).

В даному підрозділі буде детальніше розглянуто математичну модель кожного із цих алгоритмів.

2.2.2.1. Орієнтований FAST та поворотний BRIEF (ORB).

ORB є об'єднанням таких алгоритмів як FAST та BRIEF з великою кількістю модифікацій. Цей алгоритм був представлений в 2011 році та розповсюджується по концепції відкритого коду [27].

Спочатку використовується FAST для визначення ключових точок, після чого використовується оцінювач кутів Харріса для знаходження найкращих N точок. Також використовується метод пірамід для визначення ключових точок, що не залежать від масштабу. Основною проблемою алгоритму FAST є не вміння визначати направленість точок. В даному алгоритмі даний недолік був виправлений [27].

Для цього обчислюється центроїд зважений по інтенсивності з розташованим у центрі кутом. Напрямок вектору від цієї кутової точки до центру центроїда дає направлення. Для поліпшення роботи використовують моменти які обчислюються для осей X і Y у колі радіусом r .

Далі використовується BRIEF дескриптор. Недоліком BRIEF є те що він не чутливий до поворотів. В ORB це виправляється за рахунок розрахунку для кожної точки варіанту поверненої даної точки. Крок дискретизації поворот складає 12 градусів. Відповідно будується таблиця пошуку попередніх габлонів з поворотом.

Також варто зазначити що, ORB набагато швидше та краще ніж SURF. ORB - хороший вибір у пристроях малої потужності для панорамного зшивання тощо.

2.2.2.2. Масштабне незалежне перетворення ознак.

SIFT базується на знаходженні ключових точок, які базуються на кутах. Кути в різних масштабах можуть змінювати свої величини, тому для того щоб даний алгоритм був інваріант для масштабу використовують метод різниці Гаусіан. Цей метод є наближенням Гаусових Лапласіан. Різниця по Гаусу отримується як різниця зображень з різними коефіцієнтами масштабу σ . Цей процес відбувається для різних октав зображення – зображень з різними масштабами. Як тільки різниця Гаусіан найдена, на зображеннях шукають локальні екстремуми в масштабі і просторі. Наприклад, один піксель порівнюється з вісьма сусідніми, а також з дев'ятьма пікселями в наступному і попередньому масштабах. Якщо ця точка є локальним екстремумом, то це потенційно ключова точка. Це означає, що дання точка найкраще представлена саме в цьому масштабі [28].

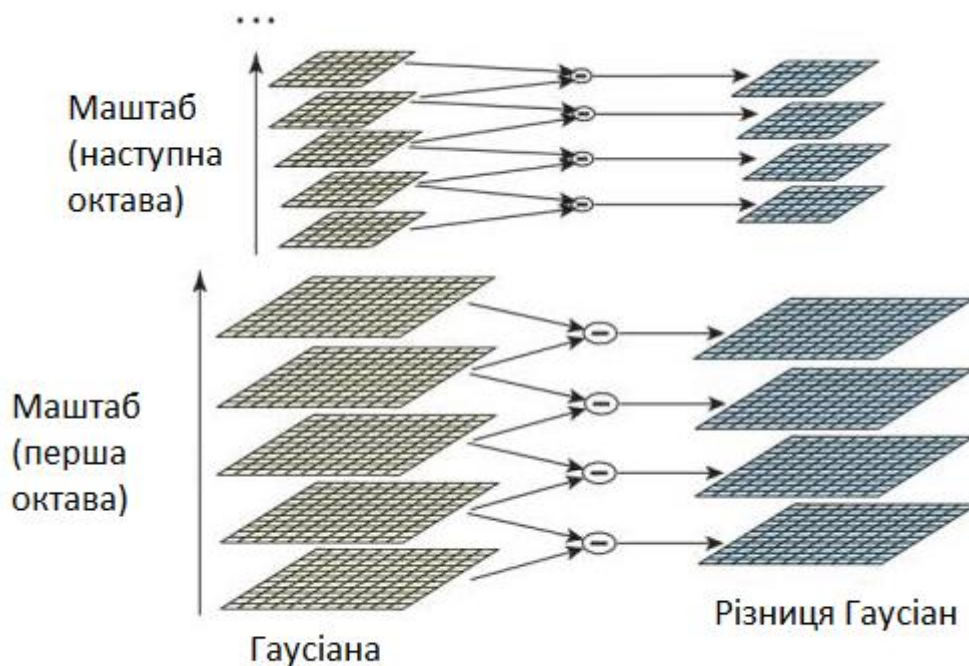


Рисунок. 2.2. Демонстрація знаходження різниці Гаусіан.

Як тільки потенційні точки знайдені, їх необхідно уточнити, для отримання більш точних результатів. Для цього використовують розширення масштабу за шкалою Тейлора, щоб отримати більш точні значення

екстремумів і якщо значення інтенсивності менші за порогові то вони відкидаються. Це фільтрування називається контрастним.

Також в різниці Гаусіан високий відклик на ребра, тому їх необхідно видалити. Для цього використовується концепція схожа до кутового детектора Харріса. Береться матриця Гессіана розміром 2×2 для визначення кривизни. Для ребра одне власне значення більше за інше, тому якщо відношення цих значень більше порога то вона відкидається [28].

В результаті цих фільтрацій отримуються сильні ключові точки. Щоб досягти інваріантності до повороту для кожної точки береться її околиця в залежності від її масштабу і в цій точці визначається величина і напрям градієнту. Створюється гістограма направленості з 36 ячниками, які перекривають 360 градусів. Далі береться сама висока вершина в гістограмі та люба вершина яка вище 80% береться для розрахунку направленості. Відповідно створюються точки з однаковим положенням і масштабом но в різних напрямках [28].

Відповідно отримується дескриптор ключової точки, він складається з околиці 16×16 , яка розділена на 16 блоків розміром 4×4 . Для кожного блоку створюється гістограма направленості з 8 значень. Таким чином має 128 значень, які представлені у вигляді вектора.

2.2.2.3. Гістограма направлених градієнтів (HOG).

Розрахунок гістограми направлених градієнтів розпочинається з розрахунку градієнтів по осях X і Y. Це можна зробити використавши оператор Соболя з розміром ядра рівним одиниці або застосувавши згортку зображення з двома фільтрами векторам-рядком $(-1, 0, 1)$ та вектором-стовпцем $(-1, 0, 1)$. Після чого необхідно знайти магнітуду та направлення градієнта за формулами [29]:

$$g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (2.16)$$

$$\theta = \arctan \frac{g_y}{g_x} \quad (2.17)$$

де g – магнітуда, θ – напрямлення, g_x , g_y – градієнти по осі X і Y відповідно.

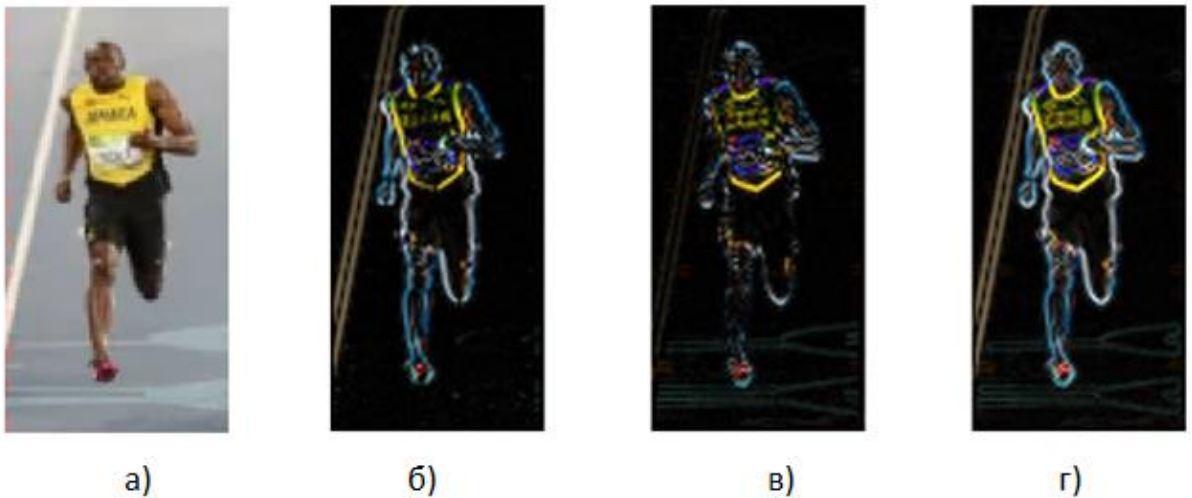


Рисунок 2.3. а) початкове зображення, б) градієнт по осі X , в) градієнт по осі Y , г) магнітуда [29].

Градієнт передає інформацію про місця різкої зміни інтенсивності зображення. При цьому видаляється несуттєва інформація, наприклад кольору, проте залишаються контури.

Для кольорових зображень градієнт рахується для кожного із каналів і відповідно вибирається градієнт з найбільшим значенням по каналу. Направлення вибирається у відповідності до максимального градієнту.

Після цього зображення розбивається на клітки розміром $N \times N$. На практиці N часто береться рівним 8. Для кожної такою клітки розраховується гістограма градієнтів. Відповідно в кожній клітці міститься $8 \times 8 \times 2 = 128$ значення, які трансформуються в гістограму розміром 9×1 . Кожне із значень в даному вектору відповідає кутам: $0, 20, 40, 60..160^\circ$. Далі береться значення напрямлення кута θ і магнітуди g . По значенню θ визначається в яку позицію буде записано значення магнітуди g . Наприклад як видно на рис. 2.3, напрямлення градієнта в першій клітці зображення має значення 80 градусів, відповідно значення градієнта записується в 5 клітку гістограми. Якщо значення кута не відповідає ні одному значенню кутів гістограми то значення

магнітуди градієнту розділюється пропорційна між двома сусідніми кутами [29]. Наприклад на рис. 2.4 демонструється для кута 10° його значення рівномірно розподіляється між 0 і 1 кліткою, які відповідають кутам 0° і 20° .

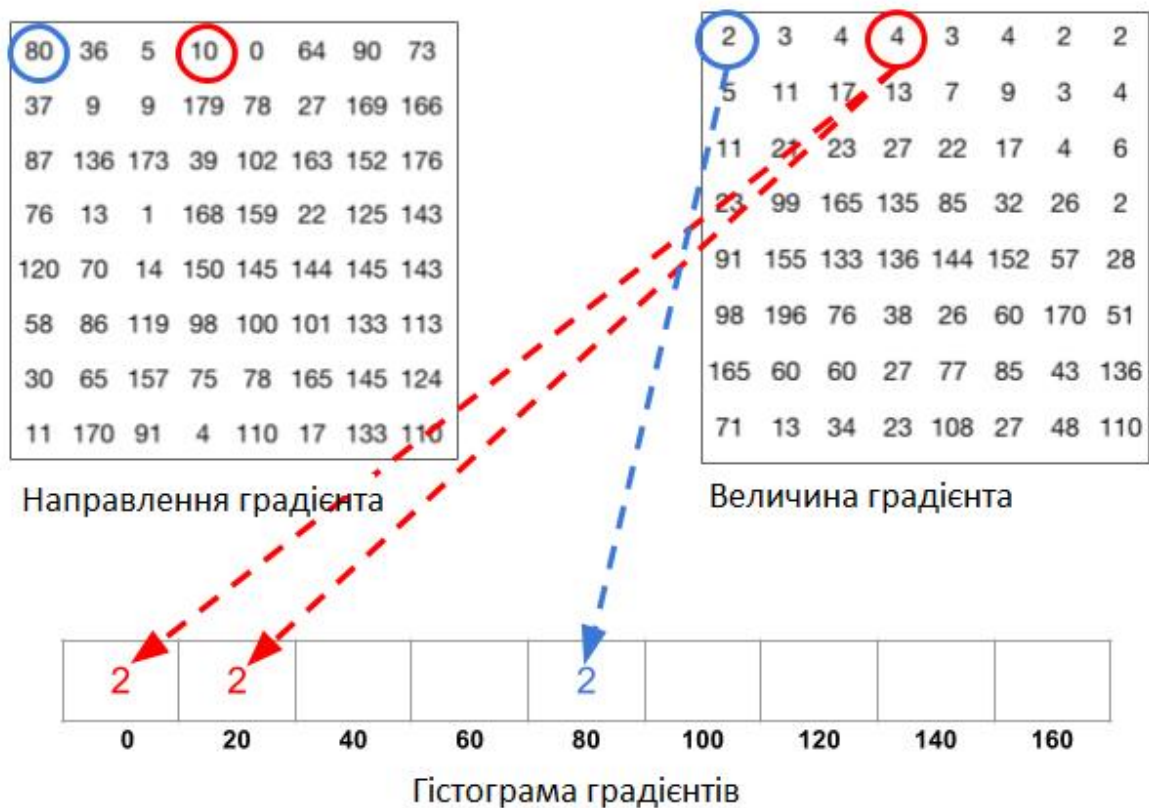


Рисунок 2.4. Демонстрація утворення гістограми градієнтів.

В результаті для кожної клітки $N \times N$ отримується гістограма з 9 значень. Проте при зміні яскравості освітлення зображення пропорційно змінюється значення гістограми. Тому щоб зробити гістограму інваріантною до освітлення, її нормалізують. Для цього беруть блок градієнтів розміром $2N \times 2N$ з якого отримують 4 значення гістограм. З яких отримують вектор розміром 36×1 і нормалізують даний вектор використовуючи норму l_2 .

В результаті для зображення розміром 64×128 і при розмірі клітки рівною 8, отримується замість $64 \times 128 \times 3 = 24576$ значень в необробленому зображенні, 3780 значень гістограми направлених градієнтів [29].

2.2.3. Математична модель співставлення ключових точок.

Після знаходження ключових точок для двох зображень необхідно знайти пари точок з кожного зображення які найкраще відповідають один

одному. Зазвичай ця відповідність розраховується для великої кількості точок, щоб зменшити кількість ймовірних хибних співставлень. Тому алгоритми для співставлення точок мають мати невеликі затрати ресурсів та високу швидкодію. Зазвичай для співставлення точок використовують 2 типи алгоритмів:

- Співставлення грубою силою.
- Співставлення за допомогою алгоритму kNN.

2.2.3.1. Співставлення грубою силою.

Суть методу прямо випливає з його назви. В даному алгоритмі виконується пряме співставлення двох наборів точок. Тобто береться одна точка з першого набору і підставляється з усіма точками із другого набору. Цей процес виконується для всіх точок з першого набору. Для кожної із цих пар знаходиться їхня норма. Відповідно пара з найменшою нормою буде відповідати найкращому співпадінні [30].

Серед норм в основному використовують Евклідову норму та норму Хеммінга. Перша норма рекомендується використовувати для дескрипторів отриманих за допомогою SIFT і SURF. Відповідно норма Хеммінга використовується для дескрипторів від ORB и BRISK.

Також для покращення точності співставлення рекомендується використовувати перехресну перевірку, яка вказує, чи повинні дві ключові точки відповідати один одному, щоб вважатися дійсними. Іншими словами, щоб пара точок вважалася дійсною, перша точка повинен відповідати другій, а друга також повинен відповідати першій як найбільш близька відповідність. Ця процедура забезпечує більш надійний набір відповідних точок.

2.2.3.2. Співставлення за допомогою методу k-найблищих сусідів.

Цей метод базується на ідеї знаходження не однієї пари найкращих співпадінь а відразу кількох, які задаються параметром k. Відповідно для цього використовується метод k-найблищих сусідів.

Відповідно щоб переконатися, що пари, які повертаються KNN, добре співставленні пропонується метод, що називається співвідношенням. По суті, ми перебираємо кожну з пар, які повернуться методом k-найближчих сусідів та проводимо дистанційний тест. Для кожної пари точок знаходиться відстань якщо відстань між парою знаходиться в певному співвідношенні, ми зберігаємо його, в іншому випадку ми викидаємо його. Це значення коефіцієнта потрібно вибирати вручну [31].

По суті, коефіцієнтне тестування виконує ту ж функцію, що і опція перехресної перевірки в співставленні грубої сили. Обидві перевірки спрямовані на те щоб переконатися, що пара виявлених об'єктів дійсно досить близькі, щоб вважатися схожими.

2.2.4. Математична модель вирівнювання та склейки зображень.

Для поєднання двох зображень між собою необхідно їх вирівняти, тобто за допомогою геометричних трансформацій привести в одну площину. Приведення зображень можна здійснити за допомогою гомографії. Гомографія це геометричне перетворення, яке відображає точки одного зображення на іншому. Гомографія може бути представлена за допомогою матриці розміром 3x3 [32]:

$$H = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

За допомогою матриці гомографії люба точка першого зображення може бути представлена в площині другого:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

де (x_1, y_1) – точка на першому зображенні, (x_2, y_2) – точка на другому зображенні.

Для знаходження матриці гомографії необхідно мати мінімум 4 пари співпадінь точок. Чим більше пар співпадінь тим кращим буде результат

перетворення. Проте алгоритми визначення гомографії дуже чутливі до точок викидів, тобто хибних пар. Відповідно для коректної роботи необхідно точки профільтрувати. Для цього існує велика кількість методів. Проте найбільшої популярності набрав метод Випадковий консенсус вибірки (RANSAC). Цей метод має певну межу нечутливості до викидів, в нашому хибних пар точок.

На відміну від лінійної регресії, яка намагається мінімізувати помилку по всіх точках, RANSAC аналізує точки не всі відразу, а частинами. Ця особливість є дуже важливою для оцінки точок для визначення гомографії [33].

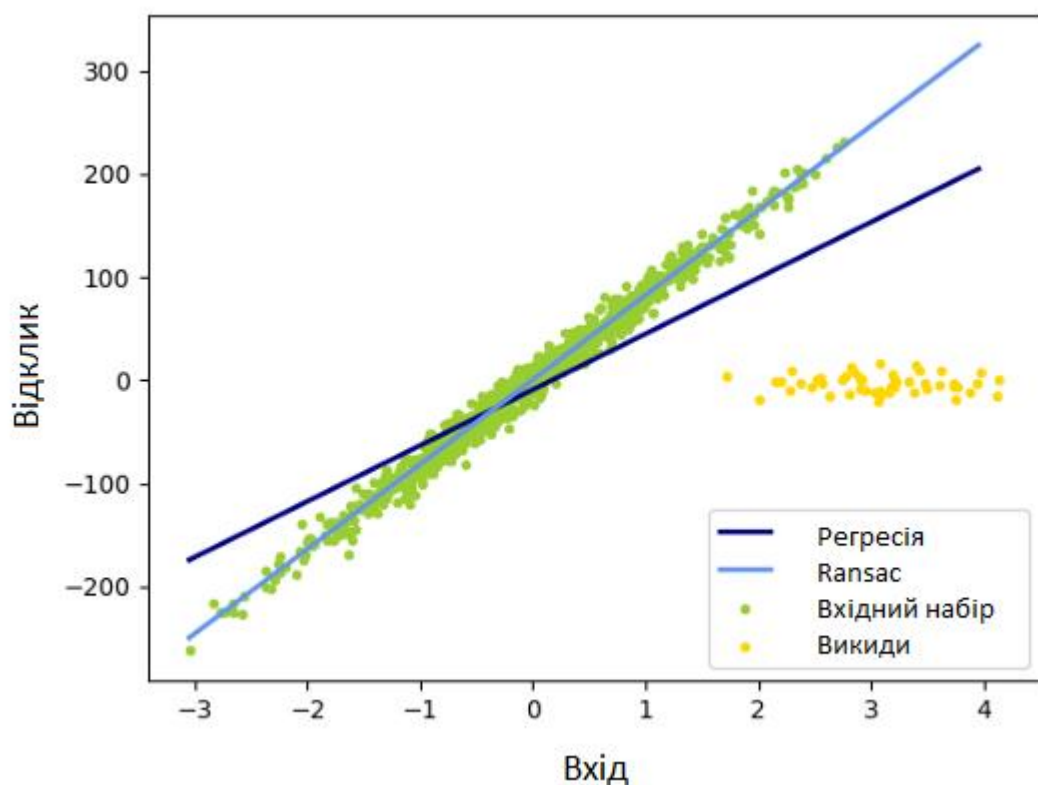


Рисунок 2.5. Порівняння роботи лінійної регресії та випадкового консенсусу вибору [33].

Після отримання відфільтрованих точок можна обчислити матрицю гомографії. Для цього використовуються чотири пари точок. Після одноразового обрахування матриці гомографії, вона використовується для перетворення усіх точок другого зображення.

2.2.5. Вирівнювання колірних балансів на зображеннях.

За рахунок того, що кожне зображення робиться з різної позиції, а також наявності різних колірних передавальних характеристик оптичної системи кожної камери ми можемо тримати зображення з різними колірними балансами. Наявність кольорових контрастів на різних частинах фінальної склейки буде погіршувати наступну обробку для різноманітних цілей та погіршувати візуальне сприйняття склейки. Тому даний недолік необхідно виправляти. Це можна зробити за допомогою двох методів:

- Альфа-змішування.
- Піраміда Гауссіан.

У альфа-змішуванні функцією зважування зазвичай є пандус. На лінії зшивання вага становить половину, тоді як далеко від лінії зшивання одному зображенню надається більше ваг, ніж іншому. Випадки, коли альфа-змішування працює надзвичайно добре, - це коли пікселі зображення добре вирівняні один до одного, і єдиною різницею двох зображень є загальний зсув інтенсивності. Альфа-змішування об'єднує два зображення безперешкодно. Однак якщо зображення не вирівняні добре, розбіжності відобразяться на змішаному зображенні [34].

Гауссова піраміда наближує, по суті, зображення в різних діапазонах частот і фільтрує їх відповідно. Чим нижча смуга частот, тим сильніше вона розмиває межу. Гауссова піраміда розмиває межу, зберігаючи пікселі від межі. Однак це не працює добре, якщо два зображення знаходяться на значно різному рівні інтенсивності. В такому випадку рекомендується перехід альфа-змішування [34].

2.3. Висновки до розділу.

В даному розділі було розроблено фізико-математичну модель роботи багатоканальної оптико-електронної системи спостереження. Було виділено основні етапи функціонування системи і трансформацій сигналу в самій системі. Для початку було розроблено фізико-математичну модель

формування електричного сигналу з оптичного, та приведено математичний апарат для аналізу цих трансформацій.

Далі було розглянуто усі необхідні етапи для склейки зображення. Під час формування фізико-математичної моделі процесу склейки зображень було виділено основні етапи склейки зображень та було описано декілька підходів до кожного з етапів.

Також варто відзначити, що під час розробки моделі було виокремлено важливість попередньої калібрування камери. Яка в свою чергу призводить до покращення якості вихідної склейки. Відповідно було розглянуто математичну модель аберацій які компенсуються за рахунок калібрування камери та розглянуто декілька варіантів проведення калібрування.

Відповідно в результаті роботи над даним розділом ми отримали достатній фізико-математичний апарат для подальшої роботи над системою на всіх рівнях. Також завдяки цьому ми маємо варіативність при побудові системи, що в свою чергу призведе до значного покращенням якості готового продукту.

РОЗДІЛ 3. ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ.

3.1. Габаритний розрахунок.

Завданням габаритного розрахунку є визначення числа компонентів, складових оптичної системи, і їх основних параметрів: фокусних відстаней, апертурних і польових кутів, відстаней між компонентами, світлових діаметрів, а також положень зіниць окремих компонентів і всієї системи. На цьому етапі розрахунку вибирають доцільну конструкцію оптичної системи, наприклад, найбільш зручний спосіб обертання зображення, тип обертаючої системи (лінзова або призмове), спосіб проектування джерела світла в проєкційних системах і ін.

На стадії габаритного розрахунку передбачається, що оптична система і її компоненти є ідеальними, тому розрахунок проводиться за формулами ідеальної оптичної системи. Компоненти системи вважаються нескінченно тонкими. У даному розділі буде проведений розрахунок зовнішніх конструктивних параметрів об'єктива. Таким чином будуть отримані всі параметри, необхідні для складання габаритної схеми[15].

При виборі об'єктивів, окулярів, обертаючих систем та інших компонентів слід провести оцінку їх корекційних можливостей з метою одержання надалі задовільної якості зображення, однак не слід їх надмірно ускладнювати. Розрахунок можна вважати прийнятним, якщо основні оптичні характеристики компонентів системи не виходять за існуючі в практиці межі.

Визначення конструктивних елементів системи (r , d і n) є завданням абераційного розрахунку. При розрахунку оптичних систем потрібно прагнути до використання готових компонентів (об'єктивів, окулярів, конденсорів і ін.), освоєних у виробництві, так як це значно здешевлює прилади і прискорює їх виготовлення.

Вхідними даними до габаритного розрахунку є:

- Поле зору $2\omega = 60^\circ$;
- Горизонтальний розмір ПЗЗ-матриці: $g_h = 5.095$ мм;

- Вертикальний розмір ПЗЗ-матриці: $g_v = 4.930$ мм;
- Дистанція до об'єкта: $l = 100$ м.

Для початку необхідно розрахувати діагональ сенсора:

$$d = \sqrt{g_h^2 + g_v^2} \quad (3.1)$$

Відповідно діагональ сенсора дорівнює: $d = 6.089$ мм.

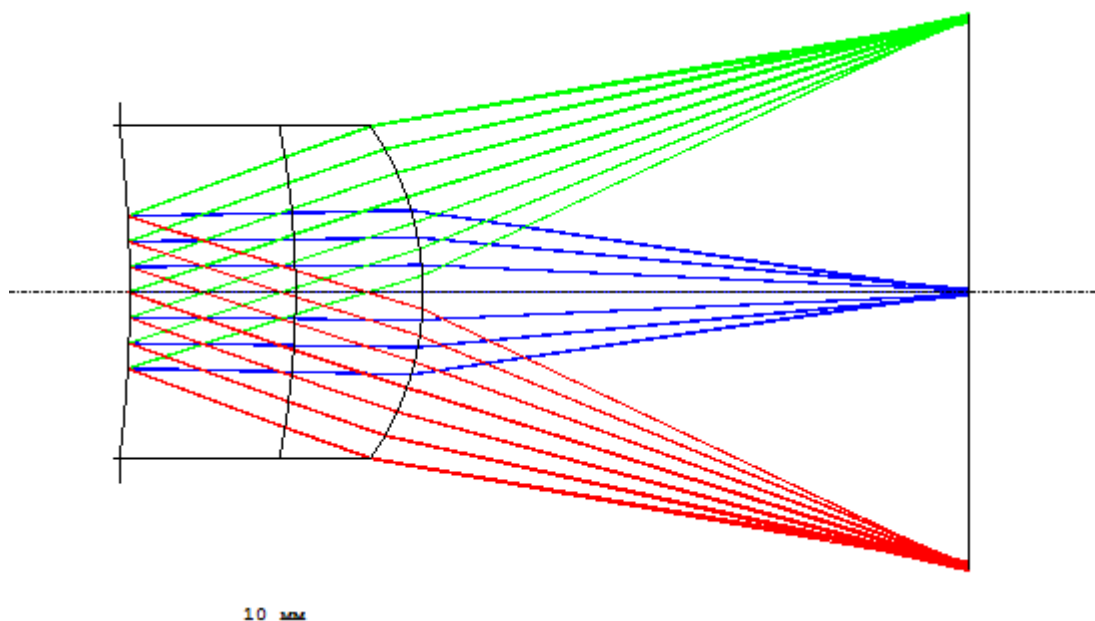
Далі необхідно знайти фокусну відстань об'єктива:

$$f' = d * l / 2\omega \quad (3.2)$$

Відповідно фокусна відстань дорівнює: $f' = 10$ мм.

В результаті розробки об'єктива за допомогою комп'ютерного забезпечення було розроблено два об'єктива і вибрано найкращий по властивостям об'єкти, що складається з склейки двох лінз.

► Предмет	<input checked="" type="checkbox"/> Стандартна			Нескінчен.		Нескінчен.			0.000000
1(АД)	<input type="checkbox"/> Стандартна			-24.558593	V	3.000000		LZ_K8	3.000000
2	<input type="checkbox"/> Стандартна			-15.405365	V	2.300994	V	LZ_F6	3.000000
3	<input type="checkbox"/> Стандартна			-5.192509	V	9.872718			3.000000
Зображ.	<input type="checkbox"/> Стандартна			Нескінчен.		0.000000			5.000000



Довжина хвилі, [нм]	F, [мм]	F', [мм]	Sf, [мм]	S'f', [мм]	Sh, [мм]	S'h', [мм]
0,47999	-9,94238	9,94238	-6,04017	10,74948	3,90221	0,80710
0,54607	-10,07960	10,07960	-6,15967	10,89110	3,91994	0,81149
0,64385	-10,20987	10,20987	-6,27312	11,02548	3,93676	0,81560

Рисунок 3.1. Параметри об'єктива та вигляд об'єктива.

Даний об'єктив задовольняє розрахованим значенням кута зору та фокусної відстані. При цьому є технологічно не складним у виготовленні.

3.2. Аберацийний аналіз.

Аберацийний аналіз даного об'єктива буде проведено за допомогою комп'ютерного забезпечення та буде розглянуто наступні параметри:

- Поперечна аберация.
- Хвильова аберация.
- Сферична аберация.
- Кривизна поля.
- Астигматизм.
- Дисторсія.
- Хроматизм збільшення.

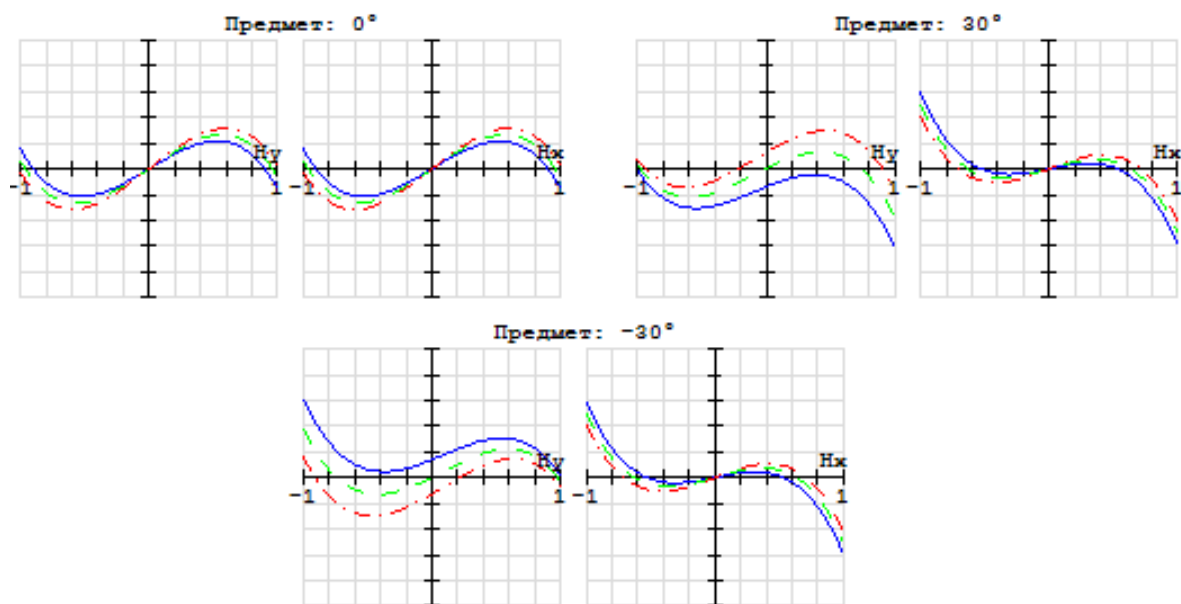


Рисунок 3.2. Поперечна аберация.

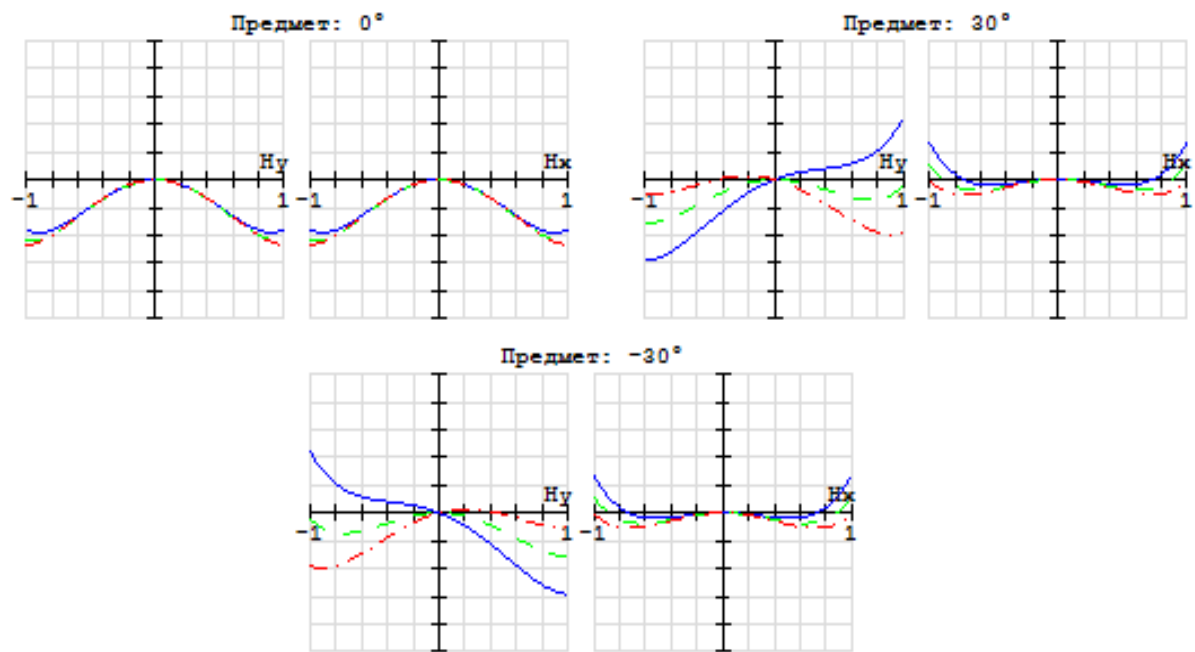


Рисунок 3.3. Хвильова аберація.

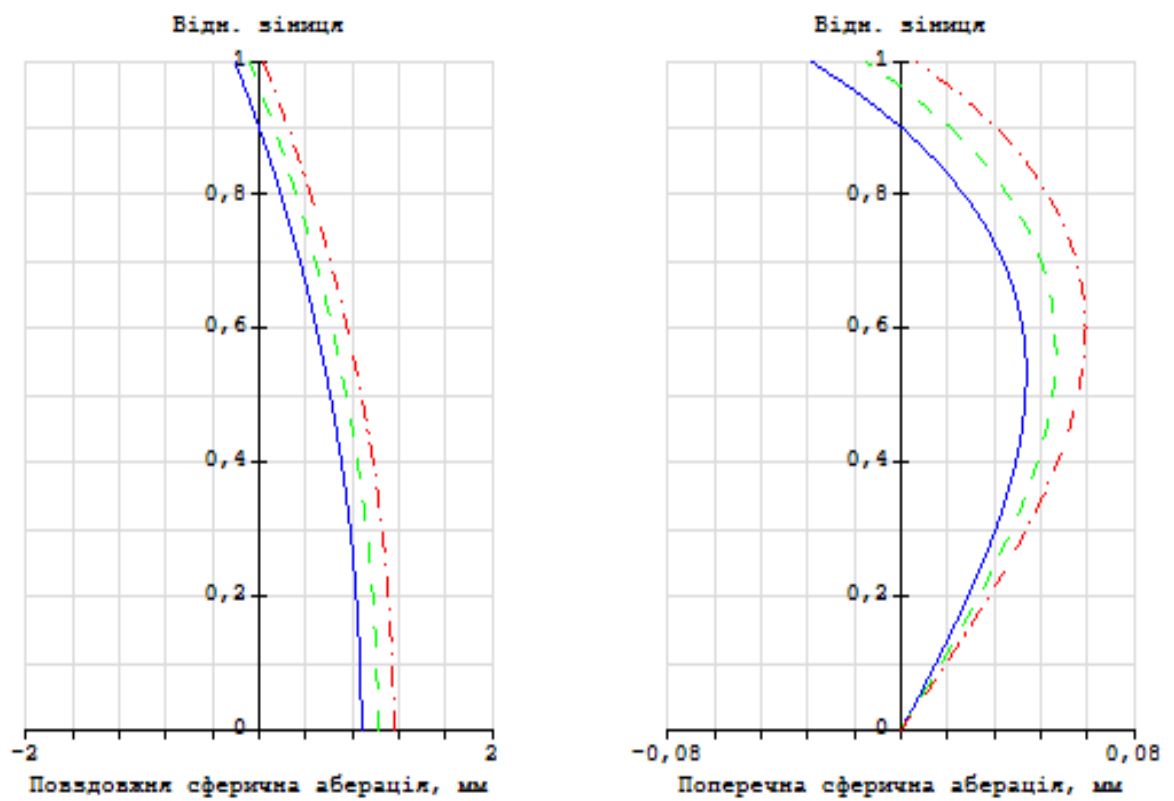


Рисунок 3.4. Сферична аберація.

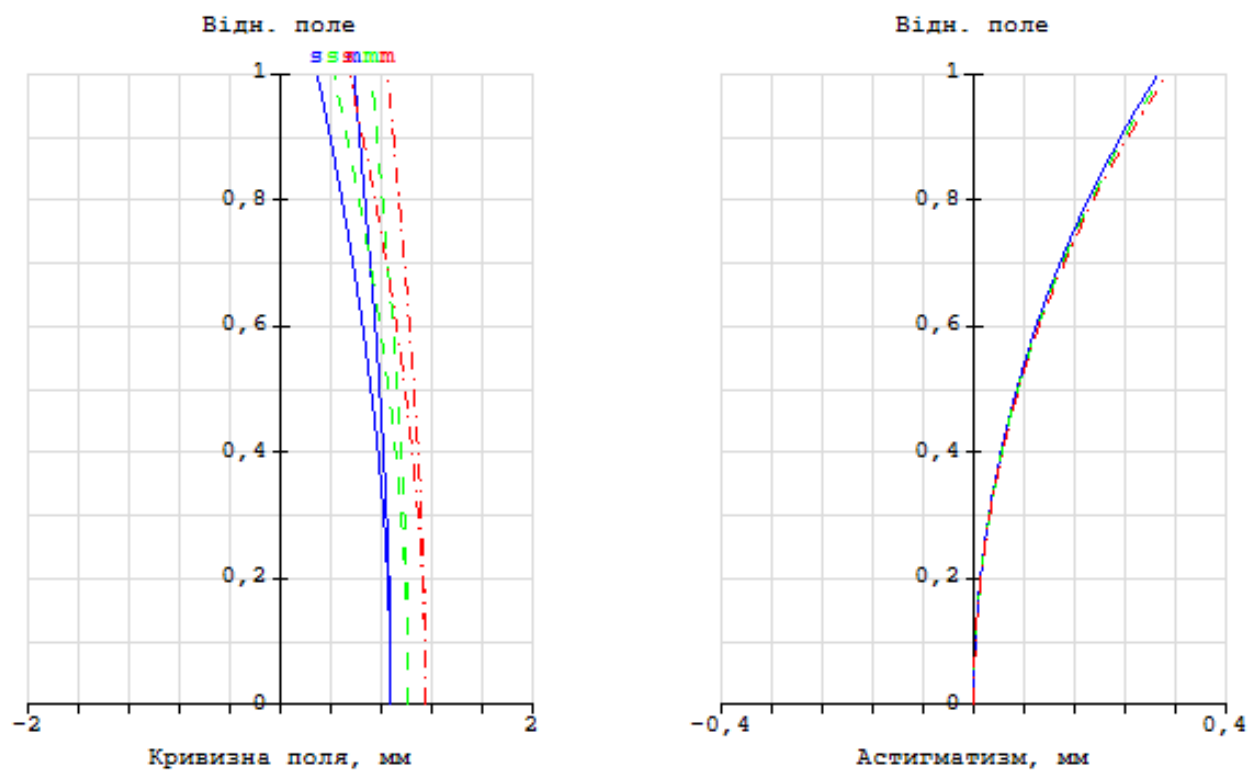


Рисунок 3.5. Кривизна поля та астигматизм.

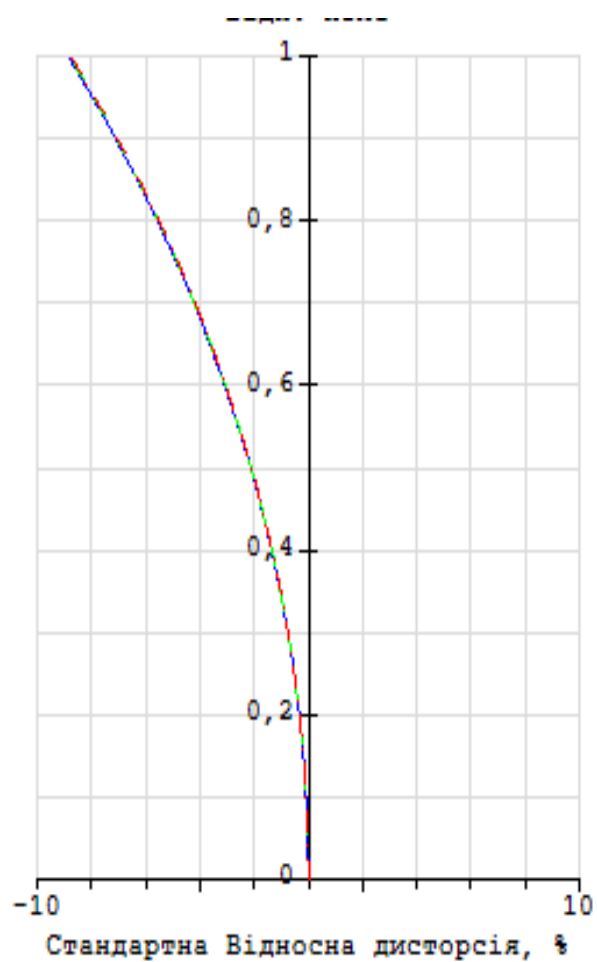


Рисунок 3.6. Дисторсія.

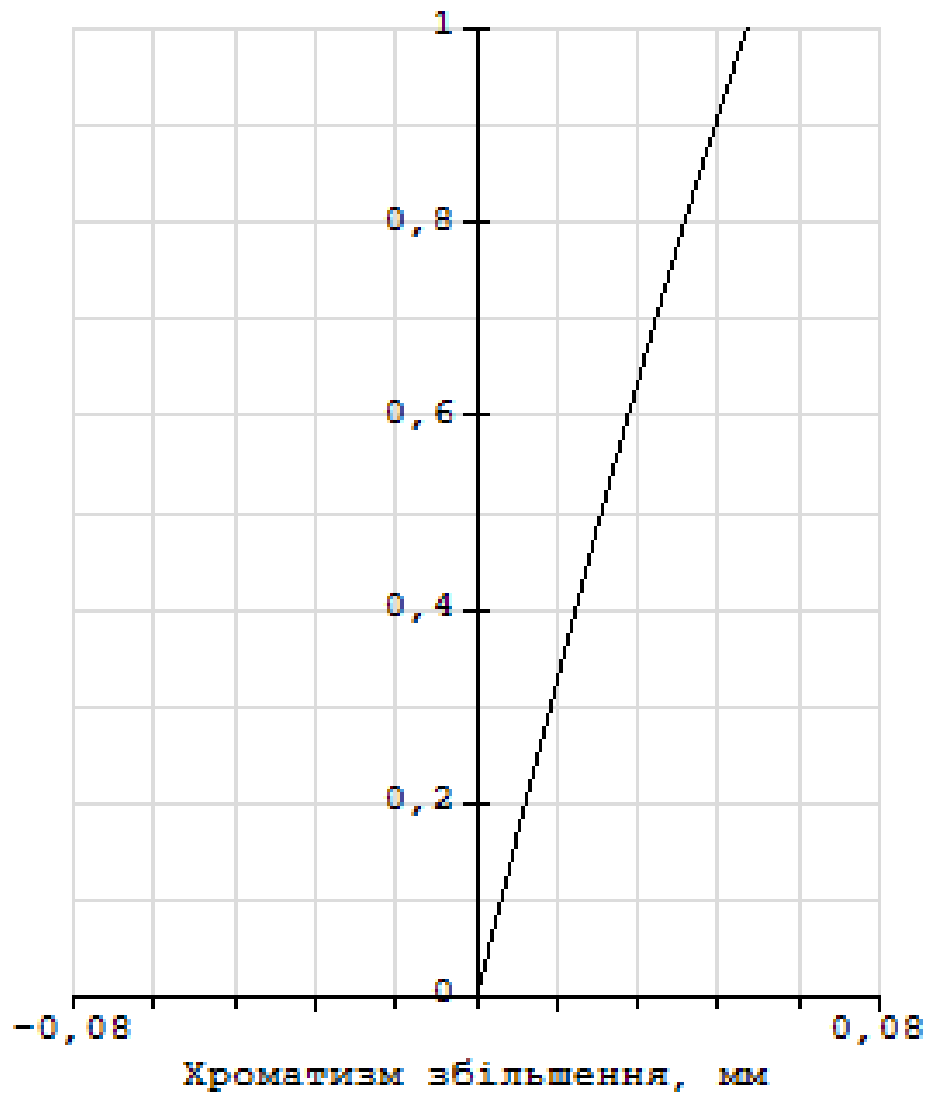


Рисунок 3.7. Хроматизм збільшення.

3.3. Енергетичний розрахунок.

Суть роботи багатоканальної оптико-електронної системи спостереження заключається в прийомі і аналізі фонового випромінювання. Тому при енергетичному розрахунку буде аналізувати випромінювання від Сонця яке відбивається від поверхні Землі з коефіцієнтом відбивання $\rho = 0.4$. Також в моєму випадку джерело випромінювання буде протяжним, тобто таким що перекриває все поле зору оптичної системи БОЕСС. Розрахунок буде проводитись для спектрального діапазону: 400-700 нм для 6 точок.

3.3.1. Розрахунок спектрального потоку.

Для визначення потоку, що потрапляє на один фотодіод сенсора буде використовуватись наступна формула:

$$\Phi(\lambda) = E(\lambda) \cdot A_n \quad (3.3)$$

де $\Phi(\lambda)$ - спектральний потік, що потрапляє на ПЗЗ-матрицю;

$E(\lambda)$ - освітленість на ПЗЗ-матриці; A_n - площа одного ПЗЗ-матриці.

Освітленість на приймачі визначається наступним чином:

$$E(\lambda) = L(\lambda) \cdot \tau_A(\lambda) \cdot \Omega \cdot \tau_O \quad (3.4)$$

де $L(\lambda)$ – яскравість земної поверхні;

$\tau_A(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання земної атмосфери;

τ_O – коефіцієнт пропускання оптичної системи;

Ω – тілесний апертурний кут оптичної системи, який визначається за формулою:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot D_{\text{вх.зн}}^2}{4 \cdot (f')^2} \quad (3.5)$$

де $D_{\text{вх.зн}}$ – діаметр вхідної зіниці об'єктиву;

f' – фокусна відстань об'єктиву

Яскравість земної поверхні (якщо вважати Землю ламбертовим випромінювачем) обчислюється за наступною формулою:

$$L(\lambda) = \frac{M(\lambda)}{\pi} \quad (3.6)$$

де

$$M(\lambda) = E_3(\lambda) \cdot \rho \quad (3.7)$$

Тоді

$$L(\lambda) = \frac{E_3(\lambda) \cdot \rho}{\pi} \quad (3.8)$$

де $E_3(\lambda)$ – освітленість поверхні Землі Сонцем.

ρ – альbedo Землі.

Освітленість Землі Сонцем можна визначити з графіку на рис. 3.8, де

Спектр АМО – спектр випромінювання за межами земної атмосфери;

АЧТ - апроксимований спектр випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 5800К;

Спектр АМ1 – спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в зеніті;

Спектр АМ2 – спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, при куті між Сонцем і зенітом 60° .

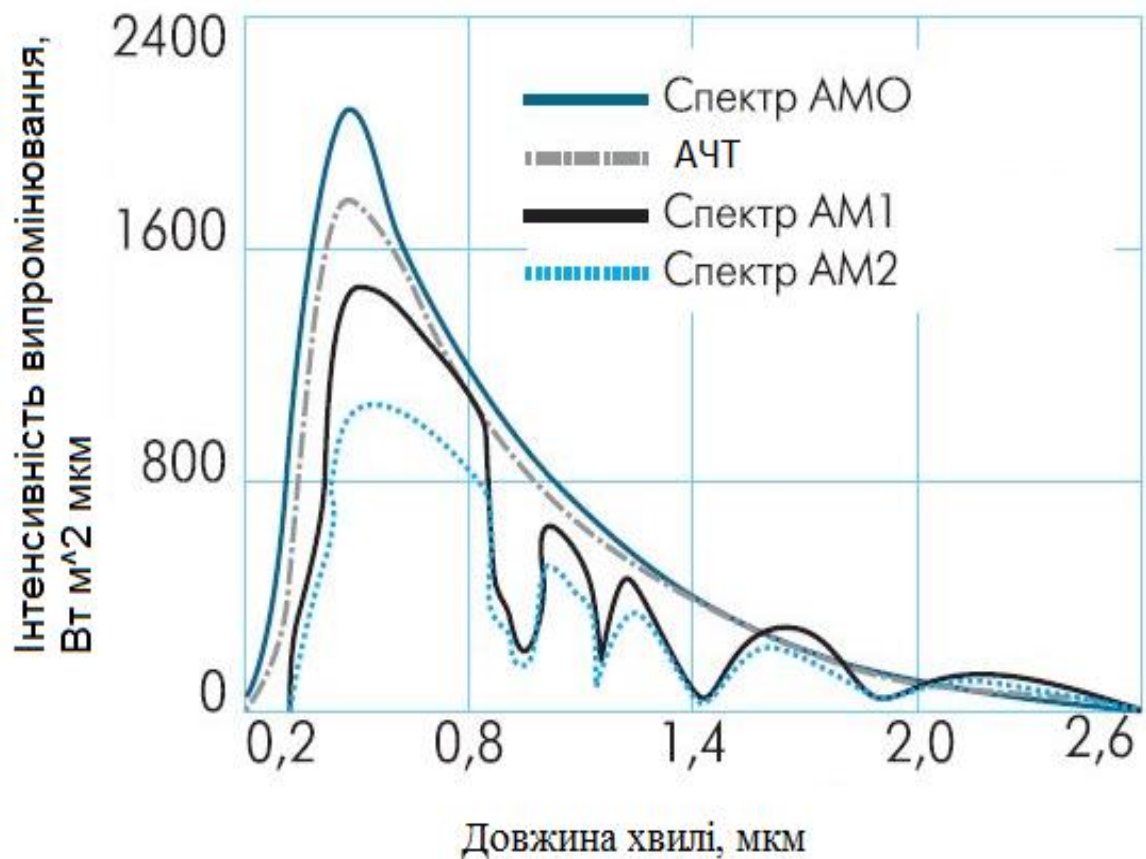


Рис. 3.8 Освітленість, що створює Сонце.

Підставивши в формулу (3.6) вираз (3.7) і (3.10) та підставивши отриманий вираз в (3.5) отримаємо рівняння спектрального потоку який потрапляє на об'єкти оптичної системи:

$$\Phi_{\Pi}(\lambda) = E_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{A_n \cdot D_{\text{вх.зн}}^2 \cdot \tau_A(\lambda) \cdot \tau_O \cdot \rho}{4 \cdot (f)^2} \quad (3.9)$$

3.3.2. Розрахунок пропускання атмосфери.

Для розрахунку пропускання атмосфери необхідно визначити довжину траси, оскільки сенсор буде встановлюватись на БПЛА то приймемо її рівною 0,1 км. Також будемо вважати, що в атмосфері відсутні опади та туман. Тому основними параметрами які потребують розрахунку є ослаблення за рахунок водяних парів, ослаблення за рахунок молекул вуглекислого газу та на частинках що присутні в атмосфері.

Для розрахунку коефіцієнтів пропускання за першими двома факторами ($\tau_{H_2O}(\lambda)$ та $\tau_{CO_2}(\lambda)$ відповідно) скористаємось методом Пасмана – Лармора, а для визначення коефіцієнту розсіювання на частинках скористаємось наступною формулою [4]:

$$k_p(\lambda) = \frac{3.91}{d_v} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3} \quad (3.10)$$

де d_v – метеорологічна дальність видимості (для наших умов приймемо рівною 20 км);

λ – довжина хвилі.

Тоді коефіцієнт пропускання за рахунок розсіювання на частинках $\tau_p(\lambda)$ буде дорівнювати:

$$\tau_p(\lambda) = 1 - k_p(\lambda) \quad (3.11)$$

В результаті розрахунку отримаємо:

Табл. 3.1 Пропускання за рахунок розсіювання.

λ , мкм	$k_p(\lambda)$	$\tau_p(\lambda)$
0,4	0,296	0,704
0,45	0,253	0,749
0,5	0,221	0,779
0,55	0,196	0,793

0,6	0,175	0,825
0,65	0,156	0,839
0,7	0,143	0,857

Для розрахунку $\tau_{H_2O}(\lambda)$ та $\tau_{CO_2}(\lambda)$ за методом Пасмана – Лармора, спочатку необхідно визначити ефективну товщину конденсованого водяного пару ω_{ef} та ефективну довжину траси L_{ef} відповідно. Для цього скористаємося формулами наведеними в літературі [7]:

$$\omega_{\text{ef}} = \omega_0 \cdot \frac{e^{-0.5154 \cdot H_1} - e^{-0.5154 \cdot H_2}}{0.5154 \cdot \cos \gamma} \quad (3.12)$$

$$L_{\text{ef}} = \frac{e^{-0.123 L_1} - e^{-0.123 L_2}}{0.123 \cdot \cos \gamma} \quad (3.13)$$

де ω_0 – кількість осадженої води на приземній трасі довжиною 1 км. при певній температурі і відносній вологості повітря. Для температури 20°C і відносної вологості 80% $\omega_0=13,856$;

H_1 і H_2 – висоти траси над рівнем моря;

γ – кут між нормаллю до земної поверхні та напрямком розповсюдження сонячного випромінювання (В моєму випадку сонце знаходиться в зеніті тому $\gamma=0$).

В результаті розрахунку отримаємо: для траси довжиною 0,3 км.: $\omega_{\text{ef}}=2,633$; $L_{\text{ef}}=0,198$

В зв'язку з малим впливом CO_2 на прозорість атмосфери на відносно низьких трасах (що впливає з перегляду таблиці 7), коефіцієнт $\tau_{CO_2}(\lambda)$ беремо рівним 1 для всього спектру.

Використовуючи таблиці Пасмана – Лармора, отримаємо наступні значення $\tau_{H_2O}(\lambda)$:

Табл. 3.2 Пропускання за рахунок розсіювання на водяних парах.

λ , мкм	$\tau_{H_2O}(\lambda)$:
0,4	0,860
0,45	0,879
0,5	0,901
0,55	0,913
0,6	0,929
0,65	0,933
0,7	0,937

Відповідно сумарний коефіцієнт пропускання атмосфери прийме вигляд:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_P(\lambda) \cdot \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda) \quad (3.14)$$

Табл. 3.3 Пропускання атмосфери.

λ , мкм	$\tau_A(\lambda)$
0,4	0,5632
0,45	0,6342
0,5	0,7019
0,55	0,7361
0,6	0,7664
0,65	0,7894
0,7	0,8114

3.3.3. Розрахунок пропускання системи.

Повний коефіцієнт пропускання ОС з урахуванням втрат на відбивання, поглинання та розсіювання світла розраховується за формулою:

$$\tau = \prod_{k=1}^K (1 - \rho_k) \prod_{m=1}^M (1 - \alpha_m)^{l_m} \prod_{n=1}^N \rho_{\partial zn} \quad (3.15)$$

де K – кількість поверхонь оптичних елементів, що заломлюють світло; ρ_k – коефіцієнт відбивання k -ої поверхні; M – кількість оптичних елементів, крізь які проходить світло; l_m – товщина m -го елемента вздовж оптичної осі; α_m – показник ослаблення світла m -тим елементом; N – кількість дзеркальних поверхонь; $\rho_{дзн}$ – коефіцієнт відбивання на n -ій дзеркальній поверхні.

Оскільки в оптичній системі сенсора дзеркальні поверхні відсутні, то вираз (3.15) набуває вигляд:

$$\tau = \prod_{k=1}^K (1 - \rho_k) \prod_{m=1}^M (1 - \alpha_m)^{l_m} \quad (3.16)$$

Розрахуємо окремо коефіцієнти пропускання та поглинання системи. Для цього запишемо всі необхідні для розрахунку характеристики скла лінз та їхні товщини (Табл. 3.4).

Табл. 3.4 Характеристики лінз.

Марка скла	Товщина елемента, l , см	Показник заломлення, n	Показник ослаблення, α , см^{-1}
K8	0,3	1,51872	0,0035
Ф6	0,23	1,60323	0,0037

Коефіцієнти відбиття на поверхні визначається за формулою:

$$\rho = \left(\frac{n_{i-1} - n_i}{n_{i-1} + n_i} \right)^2 \quad (3.17)$$

де n_i , n_{i-1} – показники заломлення i -го та $i-1$ -го середовища відповідно.

Загальний коефіцієнт пропускання за рахунок відбивання визначається за формулою:

$$\tau_{відб} = \prod_{k=1}^K (1 - \rho_k) \quad (3.18)$$

Оскільки в нас дві лінзи виготовлені з одного матеріалу коефіцієнт пропускання $\tau_{відб}$ для двох лінз буде дорівнювати:

$$\tau_{відб} = (1 - \rho_1)^2 \quad (3.19)$$

Коефіцієнт відбивання для лінзи з матеріалу К8:

$$\rho_1 = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 = \left(\frac{1,51872 - 1}{1,51872 + 1} \right)^2 = 0,0424.$$

Коефіцієнт відбивання для лінзи з матеріалу Ф6:

$$\rho_1 = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 = \left(\frac{1,60323 - 1}{1,60323 + 1} \right)^2 = 0,05369$$

Відповідно загальний коефіцієнт пропускання системи на відбивання дорівнює:

$$\tau_{відб} = (1 - 0,0424) \cdot (1 - 0,05369) = 0,906$$

Загальний коефіцієнт пропускання за рахунок поглинання визначається за формулою:

$$\tau_{ногл} = \prod_{m=1}^M (1 - \alpha_m)^{l_m} \quad (3.20)$$

Звідси коефіцієнт пропускання $\tau_{ногл}$ даної системи буде дорівнювати:

$$\tau_{ногл} = (1 - \alpha_1)^{l_1} \quad (3.21)$$

Підставляючи показники ослаблення з таблиці 3.4 в формулу (3.21), отримаємо:

$$\tau_{ногл} = (1 - 0,0035)^{0,3} * (1 - 0,0036)^{0,23} = 0,998$$

Помноживши отримані коефіцієнти $\tau_{відб}$ та $\tau_{ногл}$, розрахуємо повний коефіцієнт пропускання ОС:

$$\tau_o = \tau_{відб} \cdot \tau_{ногл} = 0,917 \cdot 0,9937 = 0,911.$$

Підставивши отримані значення коефіцієнтів пропускання атмосфери та оптичної системи, а також значення освітленості земної поверхні Сонцем з

рис. 3.9 для спектру АМ1 в формулу (3.9) отримаємо наступні значення спектрального потоку:

Табл. 3.5. Спектральний потік, що потрапляє на об'єкти.

λ , мкм	$\Phi_{\Pi}(\lambda)$, Вт
0,4	$3,55 \cdot 10^{-5}$
0,45	$5,31 \cdot 10^{-5}$
0,5	$6,4 \cdot 10^{-5}$
0,55	$6,63 \cdot 10^{-5}$
0,6	$6,82 \cdot 10^{-5}$
0,65	$6,531 \cdot 10^{-5}$
0,7	$6,337 \cdot 10^{-5}$

Відповідно інтегральний потік буде рівний: $23,42 \cdot 10^{-5}$.

3.3.4. Розрахунок відношення сигнал шум.

Для аналізу розподілу освітленості $E_3(x,y)$ будемо використовувати ПЗЗ-матрицю, яка має такі параметри:

- 1) спектральна чутливість $R_D(\lambda) = 6 \text{ В} \cdot \text{см}^2 / \text{мкДж}$;
- 2) напруженість шумового сигналу $U_N = 200 \text{ мкВ}$;
- 3) час накопичення $T_i = 33 \text{ мс}$;
- 4) формат матриці $p \times q = 1/4$;
- 5) розмір пікселя $V_D \times W_D = 14 \times 14, \text{ мкм}$;
- 6) розмір матриці $x_D \times y_D = 5,069 \times 4,981 \text{ мм}^2$.

Знайдемо величину експозиції, яку забезпечує освітленість:

$$H(x,y) = E_3(x,y) \cdot T_i. \quad (3.22)$$

Тоді сигнал на виході пікселя дорівнює:

$$U_S = R_D \cdot H(x,y) = R_D \cdot E_3(x,y) \cdot T_i. \quad (3.23)$$

де R_D – чутливість ПВ на довжині хвилі λ .

Відношення сигнал/шум визначається як:

$$SNR = \frac{U_S}{U_N}. \quad (3,24)$$

Таким чином для енергетичного розрахунку потрібні наступні параметри окремих складових ОС:

- 1) параметри джерела випромінювання – відбите випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 400-700 \text{ нм}$;
- 2) параметри об'єктива: фокусна відстань $f' = 10 \text{ мм}$, діаметр вхідної зіниці $D_p = 5 \text{ мм}$;
- 3) коефіцієнт пропускання ОС $\tau = 0,906$;

Послідовність розрахунку наступна:

1. Розраховуємо за відомими методиками освітленість яка потрапляє на об'єктив:

$$E_0 = \frac{\Phi}{A} = \frac{23,4 \cdot 10^{-5}}{25 \cdot 10^{-6}} = 9,36 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right).$$

2. За формулою (3.22) знаходимо експозицію:

$$H = 9,36 \cdot 33 \cdot 10^{-3} = 3,088 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right).$$

3. За формулою (3.23) розраховуємо величину сигналу на виході ПЗЗ-матриці:

$$U_S = 600 \cdot 3,088 \cdot 10^{-3} = 0,1852 (B).$$

4. Тоді відношення сигнал/шум дорівнює:

$$SNR = \frac{1,852}{200 \cdot 10^{-6}} = 926.$$

3.4. Висновок до розділу.

В даному розділі було виконано усі необхідні інженерні розрахунки. Для початку було розроблено об'єктив, який задовольняє усім вимогам, що поставлені до багатоканальної оптико-електронної системи спостереження. Після чого було проведено абераційний аналіз систем з використанням програмного забезпечення. Цей аналіз показав повну відповідність об'єктива стандартним критеріям то показникам готових об'єктивів. В результаті чого можна зробити висновок, що габаритний розрахунок та проектування

об'єктива було виконано правильно і розрахований об'єктив цілком підходить для багатоканальної системи спостереження.

Наступним етапом у виконанні інженерних розрахунків була перевірка відповідності оптико-електронної системи відношенню сигнал/шум. В ході цієї перевірки було враховано пропускання оптики, а також пропускання атмосфери, прораховано відповідні коефіцієнти. Також було розраховано потік, який потрапляє на об'єктив системи і вихідний інтегральний потік, що потрапляє на приймач, який представлений ПЗЗ-матрицею. Відповідно було отримано усі необхідні дані для проведення розрахунку співвідношення сигнал/шум.

Наступний розрахунок відношення сигнал/шум показав, що це відношення в системі зберігається на достатньо високому рівні, що в свою чергу свідчить про правильність підпору і розрахунку усіх компонентів оптико-електронного тракту систему. В результаті чого було отримано усі необхідні дані для проектування дослідного зразку та проведення конструкторської та дослідної роботи.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ.

Основною задачею, що ставиться в даному розділі є розробка конструкції багатоканальної оптико-електронної системи спостереження. Дана система буде представлена в двох варіаціях. Перша для використання в якості 40 мм снаряду для вистрілу і подальшого спускання на парашуті. Друга варіація має бути представлена в якості повністю автономної системи для безпілотного літального апарату.

Відповідно необхідно продумати конструкцію так, щоб вона була універсальна і модульна. Тобто, щоб легко з мінімальними часовими затратами система могла трансформуватись з 40 мм калібру в варіант для БПЛА і в зворотному напрямку.

В ході аналізу варіантів конструкцій було обрано наступну компоновку для системи:

Універсальний тубус для об'єктива.

Універсальний блок кріплення об'єктивів.

Змінний фіксатор плати електронних компонентів для об'єктивів.

Колба патрона для 40 мм.

Блок міні-комп'ютера з акумулятором.

Відповідно буде два універсальних компонента, перший тубус і кришка для об'єктива, яка буде містити об'єктив, ПЗЗ-матрицю та процесор для зчитування відео. Другий компонент буде слугувати для фіксації об'єктивів та для розташування процесора з радіо передатчиком для варіанта в 40 мм калібрі.

Наступний компонент буде представлений в двох варіантах. Перший який з'єднується з блоком кріплення об'єктивів за допомогою різьбового з'єднання та з різьбовим з'єднанням з блоком міні комп'ютера.

Далі компоненти будуть для відповідних варіацій: блок міні-комп'ютера з акумуляторами для варіанту з використанням на БПЛА. Ще одним компонентом є колба патрона, яка буде кріпитись за допомогою пластикових штирів, які будуть згорати під час вистрілу. В даній колбі буде

розташовуватись парашут, і пружина яка буде відвідувати колбу на висоті, після вистрілу, що дозволить відкритись парашутові.

В результаті можна зробити висновок, що в ході виконання даного розділу було розроблено універсальну модульну конструкцію, яка буде легко трансформуватись з однієї варіації в іншу. Також дана конструкція є легкою в виготовленні і обслуговуванні. Відповідно дана конструкція відповідає критеріям, що були поставленні на початку розділу.

Розділ 5. Розробка стартап проекту «Багатоканальна оптико-електронна система спостереження»

5.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах існуючі методи склейки зображень було запропоновано новий метод, розраховано його параметри, а також приведені експериментальні дані. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту запропонованого методу.

Ідея проекту полягає у використанні склейки зображень для створення панорамних знімків для таких сфер як, навігація, розвідка, моніторинг полів, що уточнено наведено в табл. 5.1.

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створити економічну, мобільну та компактну систему, яка забезпечує створення панорамних знімків для подальшої обробки в різних цілях.	1. Розвідка.	Швидкий і дешевий спосіб розвідки позицій противника.
	2. Робототехніка та навігація.	Покращення існуючих методів навігації за рахунок використання панорамних знімків.
	3. Аграрна.	Покращення якості та зменшення часу на створення панорамних знімків для дослідження полів.

Отже, пропонується новий спосіб створення панорамних знімків вищої якості, з меншими часовими витратами, який може бути використаний для проведення розвідки з безпілотних літальних апаратів або з використанням зброї 40 калібру, покращення методів навігації для автоматизованих систем за рахунок розширення поля зору камери з покращенням якості зображення, пришвидшення та покращення точності аналізу якості посівів на полях.

Таблиця 5.2. Інформаційна карта проекту.

Назва проекту	Багатоканальна оптико-електронна система для склейки зображень
Ідея стартап-проекту	Створити модульну компактну та дешеву систему з низькою ціною та високою якістю для склейки зображень.
Термін реалізації	12 місяців.
Необхідні ресурси	База комплектуючих.
Опис проблеми, яку вирішує стартап-проект	Покращує якість великою групи задач пов'язаних з склейкою зображення.
Головні цілі та завдання стартап-проекту	Створити система, яка стане передовою на ринкові.
Очікувані результати	Вихід на глобальний ринок систем для склейки зображень.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та

проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.3).

Таблиця 5.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка стор.)	N (нейтральна стор.)	S (сильна стор.)
		Мій проект	ARGUS-IS	Simera	L3Harris			
1	Якість знімків	Середня	Висока	Висока	Висока	+		
2	Ціна	1500	50000	30000	20000			+
3	Наявність додаткових функцій	-	+	+	+	+		
4	Вага	300 г	30 кг	20 кг	25 кг			+

Сильними сторонами ідеї проекту є ціна продукту, за рахунок використання дешевших сенсорів і простоти конструкції. Також до сильних сторін відноситься вага конструкції, яка досягається за рахунок простоти конструкції і відокремлюванням блоку обробки даних. До слабких сторін відноситься якість знімків, яка зумовлена використанням менших сенсорів і оптика для зменшення ваги продукту, хоча для умов застосування продукту даний фактор не є критичним. Також до слабких сторін відноситься відсутність додаткового функціоналу, такого як автоматичне виявлення цілей, інтелектуальний аналіз отриманих знімків, супровід об'єктів. Усунення цього недоліку призведе до значного розширення клієнтської бази, при не критичному зростанні ціні.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

На ринку існує велика кількість підходів до проблеми створення панорамних зображень. Всі існуючі рішення можна розділити на три основні групи:

- Скануючі системи.
- Ширококутні системи.
- Багатоканальні системи.

Скануючі системи представляють собою оптико механічну систему з скануючою призмою чи дзеркалом. За рахунок переміщення призми чи дзеркала вдається отримати панорамне зображення. Основним недоліком даних систем є складна конструкція і великі габарити і маса, за рахунок механічної частини.

Ширококутні системи є одними з найпростіших варіантів. Вони реалізуються за рахунок оптичних систем з великими полями зору. Хоча дані системи є найдешевшими і найкомпактнішими, проте вони мають низьку якість

за рахунок оптичних аберацій та не забезпечують такі поля зору як інші групи систем.

Багатоканальні системи виділяються відміною якістю за рахунок використання оптики з меншими кутами та кращими характеристиками. Хоча системи з даної групи мають складну конструкції, проте вони є простішими за скануючі системи. Також за рахунок заміни механічних компонентів та великогабаритних оптичних компонентів на електричні, які є значно меншими за розмірами забезпечується менша маса і компактність конструкції.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність техно- логій
1.	Створити економічну, мобільну та компактну система, яка забезпечує створення панорамних знімків високого розділення.	Скануючі системи.	Наявні	Важко- доступні
		Ширококутні системи.	Наявні	Доступні
		Багатокана- льні системи.	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: багатоканальні системи.				

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект буде реалізовуватися технологією багатоканальних систем. Цей метод є мало використовуємо, оскільки історично широкого застосування набув метод скануючих систем, при використанні ширококутних систем також можна досягнути великого поля зору при значно менших технологічних зусиллях. Проте метод багатоканальних систем дає знімки з вищим розділенням ніж два інших при меншій складності конструкції ніж метод скануючих систем.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	3
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од.	500 млн. дол.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає (16,3%/рік)
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Ліцензування продукції
5	Специфічні вимоги до стандартизації та специфікації	Є
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%

Зробивши попередній аналіз ринку, можна зробити висновок, що потенційний ринок є привабливим для входження, оскільки динаміка ринку є позитивною, мала кількість великих конкурентів та висока рентабельність.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.6).

Таблиця 5.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних	Вимоги споживачів до товару
----------	--------------------------	--	--	-----------------------------

			цільових груп клієнтів	
1	Необхідність у знімках полів з високою роздільною здатністю.	Аграрії та компанії які надіють послуги моніторингу полів.	Ціна, якість, швидкість, маса.	Приваблива ціна, високий рівень якості знімків, швидкість створення знімків.
2	Необхідність у швидкому отриманні знімків території.	Військові, прикордонники.	Ціна, швидкість.	Можливість швидко отримати знімки певної території, портативність.
3	Необхідність у ширококутних знімках високої якості.	Виробники роботизованих систем.	Габарити, якість, швидкодія.	Отримання високоякісних знімків з полем зору більше 130, компактність приладу.

Цільовою аудиторією є військові, аграрії та виробники роботизованих систем. Різна поведінка споживачів спричинена ціною, результативністю методів, компактністю та точністю. Різницею у поведінці компаній є ціна, якість та швидкість.

Таблиця 5.7. Фактори загроз.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Створення нових економічних методів	Створення нових методів склейки які будуть більш точними, швидкими та безпечними	Оптимізація запропонованого методу, освоєння нових методів з використанням штучного інтелекту
2	Оптимізація існуючих методів	Вдосконалення існуючих методів	Оптимізація запропонованого методу, освоєння нових методів з використанням штучного інтелекту
3	Вихід на ринок більш відомих компаній	Вихід на ринок компаній, які більш відомі і яким клієнти більше довіряють	Пошук методів співпраці з компаніями, які є їх конкурентами, але які не вийшли на ринок, в якому є ваша компанія
4	Використання штучного інтелекту	Використання для склейки зображень штучного інтелекту	Освоєння нових методів з використанням штучного інтелекту
5	Використання нових більш швидких методів	Використання нових технологій задля склейки зображень	Вихід на інший ринок, який потребує систем склейки зображень, огляд можливих методів для покращення продукту.

Аналіз факторів загроз показав, що поведінка конкурентів може завадити виходу на ринок, або може спричинити вихід з нього. Конкуренти можуть

створити новий метод, або вдосконалити свої існуючі методи. Також, компанії можуть використовувати нові методи склейки зображень. Тому основними реакціями компанії є оптимізація запропонованого методу та пошук нових результативніших рішень.

Таблиця 5.8. Фактори можливостей.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Потреба клієнтів в результативнішому методі	Клієнти хочуть отримати більш результативніші методи	Вдосконалення запропонованого методу
2	Винайдення простого та результативного методу	При оптимізації та аналізу методів можливе винайдення нового методу	Оптимізація запропонованого методу та аналіз існуючих
3	Можливість здешевлення методу	Нові технології можуть сприяти зменшенню ціни	Впровадження нових технологій
4	Вихід на міжнародний ринок	Можливість виходу на міжнародний ринок	Впровадження нових технологій, вдосконалення запропонованого методу

Аналіз факторів можливостей показав, що поведінка споживачів може призвести до вдосконалення методу, виходу на міжнародний ринок, можливості використання новітніх технологій. Тому, є необхідність в подальшому шукати методи вдосконалення методу, аналіз існуючих та впровадження нових технологій.

Таблиця 5.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Монополістична конкуренція	Галузь в основному є конкурентоспроможною, проте існує декілька явних лідерів	Щоб вийти на ринок необхідно мати конкурентний метод
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Закордонні конкуренти	Вихід на Український ринок не передбачає ніяких проблем, оскільки в Україні не має подібних систем, проте вихід на міжнародну арену може бути складним
4. Товарно-видова конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду	Оптимізація запропонованого методу та пошук нових
5. Ціновий характер	Продукція дорога	Зменшити вартість розробки, впровадити нові технології

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що наявна конкуренція в Україні ускладнює вихід на ринок, тому необхідно створити якісний метод. Але, мій метод є недорогим, тому може конкурувати з існуючими компаніями. Для впровадження методу за кордон, необхідно впроваджувати нові технології.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 5.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Harris, LogosTech, DARPA, 3D Robotics Aeryon Systems	Наявність товарних знаків, розмір капіталовкладень, доступ до ресурсів, можливість використання новітніх технологій	Значення розміру поставок для постачальників, налагоджені поставки	Торгівельні знаки, прибутки, система інформації	Використання звичайних камер, ширококутних камер.
Висновки:	В межах України конкурентна боротьба неінтенсивна	Є можливість і входу на ринок в Україні за рахунок за рахунок неявної конкуренції, на	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Клієнти диктують певні умови: пізнаванність продукту, ціна, реклама, якість	Товари-замінники є, але вони не є дуже точними.

		міжнародний ринок – за рахунок новітньої системи			
--	--	--	--	--	--

Зробивши аналіз конкурентного ринку, та деякі обмеження з боку клієнтів, можна зробити висновок, що робота на Українському ринку не буде дуже важкою оскільки немає наявної конкуренції. На мій погляд, вихід на міжнародний ринок можливий, не дивлячись на важку конкуренцію та наявність товарів-замінників, оскільки технологія є новою, економічною, ергономічною та якістю.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 5.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проекту
2	Ціна та собівартість продукції	Рівень цін повинен бути менший ніж ціни конкурентів
3	Якість	Якість має бути не меншою ніж у конкурентів
4	Маркетинговий потенціал	Створити гарний імідж компанії
5	Простота експлуатації	Прилад повинен бути простим у використанні для будь-яких користувачів

6	Технічне обслуговування	Міжнародна технічна допомога та обслуговування клієнтів
7	Безпечність	Рівень безпечності має бути не меншим ніж у конкурентів

Результат обґрунтування факторів конкурентоспроможності показав, що існує фактор потреби споживачів, який обумовлює необхідність розробки проекту. Цей проект повинен конкурувати в ціні та собівартості, бути безпечним, якісним, а також вийти на міжнародний рівень.

Таблиця 5.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Метод оптико-електронного позиціювання».

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Потреби споживачів	5					+		
2	Ціна та собівартість продукції	20							+
3	Якість	10					+		
4	Маркетинговий потенціал	4			+				
5	Простота експлуатації	18							+
6	Технічне обслуговування	6				+			
7	Безпечність	7				+			

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Метод оптико-електронного позиціювання» показав, що в цілому маркетинговий потенціал запропонованого проекту є дещо слабкою стороною у порівнянні з конкурентами, тому необхідно покращувати позиції в цьому напрямку. До сильних факторів конкурентоспроможності можна віднести ціну та собівартість продукції та простоту експлуатації.

Таблиця 5.13. SWOT-аналіз стартап-проектую

<u>Сильні сторони:</u> низька собівартість продукції дає змогу зменшити поріг на кінцеву ціну; висока якість продукції; технічне обслуговування, немає аналогів в Україні.	<u>Слабкі сторони:</u> трохи гірша якість ніж у широковідомих конкурентів, відсутність допоміжного функціоналу.
<u>Можливості:</u> можливість створення нового методу, вдосконалення запропонованого методу; вихід на міжнародний ринок, впровадження штучного інтелекту	<u>Загрози:</u> поява нових гравців на ринку; активність конкурентів – конкуренти можуть запропонувати нові методи; нові потреби споживачів

SWOT-аналіз стартап проекту дає зрозуміти, що сильними сторонами проекту є низька собівартість, а тому і низька ціна продукції, простота використання, технічне обслуговування, немає наявних конкурентів в Україні, та немає наявних лідерів в світі. До слабких сторін належать початковий слабкий імідж продукції на ринку. Поява нових гравців на ринку, активність конкурентів та нові потреби споживачів – це ринкові загрози, а поява нових технологій сприятиме збільшенню інтересу, потреб споживачів, а отже і зростанню ринку – це ринкові можливості, до яких можна додати можливість створення нового ринку, вдосконалення запропонованого методу, вихід на міжнародний ринок.

На основі SWOT-аналізу було розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Таблиця 5.14. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії	60%	1-4 міс.
2	Приймати участь в міжнародних конференціях	55%	3-12 міс.
3	Запросити професійних інженерів в цій галузі	20%	2-6 міс.

З усіх альтернатив було обрано проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії – 60%, а строки реалізації – найменшими 1-4 міс. Але не виключається дві інші альтернативи, оскільки вони можуть підвищити імідж серед міжнародних користувачів.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів.

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Військові і розвідка	Готові	1000 копій	Низька	Середня
	Аграрії	Не готові	100 копій	Значна	Легка

	Виробники робототехніки	Готові	500 копій	Не значна	Середня
Які цільові групи обрано: Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення що компанія буде працювати із військовими					

Цільовою групою потенційних клієнтів було обрано військових, оскільки вони мають високий попит на даний товар та низький рівень конкуренції. Не всі групи готові сприйняти продукт. Орієнтовний попит для першої групи – 1000 копій, другої – 100 копій, третьої – 500. Інтенсивність конкуренції в сегменті в рамках України не значна, а вхід у сегмент є середнім, однак тільки на міжнародний ринок. Оскільки компанія працює з декількома сегментами – вона використовуватиме стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії розвитку.

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії	Ексклюзивний розподіл	Підвищення рівня кваліфікації сприятиме оптимізації запропонованого методу, а також винайдення нових.	Стратегія диференціації

2	Запрошення іноземних спеціалістів	Ексклюзивний розподіл	Запрошення іноземних спеціалістів сприятиме розвитку компанії та можливість виходу на міжнародний ринок	Стратегія диференціації
---	-----------------------------------	-----------------------	---	-------------------------

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.17).

Таблиця 5.17 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки?
1	Ні, оскільки у конкурентів реалізовані подібні методи	Компанія буде забирати існуючих споживачів у конкурентів і шукати нових	Ні, оскільки запропонований метод сильно відрізняється	Стратегія позиціонування

Базовою стратегією конкурентної поведінки було обрано стратегію позиціонування, оскільки вона є найбільш доцільною. Компанія показує чим продукт унікальний, чим відрізняється від конкурентів, чим корисний споживачу, а саме відбувається позиціонування на особливостях технології, що

є важливим для споживачів. Також, з таблиці видно, що товар не є "першопрохідцем", але компанія не буде копіювати основні характеристики товарів у конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 5.18. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні і позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Якість	Стратегія диференціації	Використання сучасного методів та підходів для вирішення поставлених задач	Простота, якість, технічне обслуговування
2	Тенічне обслуговування			
3	Простота			

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.19 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Компактність	Товар може легко транспортуватись	Товар є компактным, що дає перевагу, оскільки клієнти можуть встановити його де завгодно.
2	Економічність	Може придбати більше людей та компаній	Придбати запропонований товар можуть більше людей

Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, показало, що споживачі, у яких буде впроваджено даний стартап-проект, будуть задовольнятися потреби, зокрема товари можуть бути доставлені у будь-яке місце, оскільки система є компактною, також придбати її можуть більшість людей.

Таблиця 5.20. Опис трьох рівнів моделі товару.

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Метод багатоканальної склейки зображень		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Якість	Нм	Тх
	2. Простота використання	Нм	Е
	3. Технічне забезпечення	М	Тх
	4. Безпечність	Нм	Тх
	5. Компактність	М	Вр
Якість: параметри тестування, стандарти, нормативи, точність, безпечність			
Пакування: Коробка з пінопластом			

	Марка: "MAS"
III. Товар із підкріпленням	До продажу: вміння проектувати оптичні та оптико-електронні прилади
	Після продажу: не потребує особливих навичок
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенту на корисну модель, комерційної таємниці	

Опис трьох рівнів моделі товару показав, що основний задум даного стартап-проекту полягає у створенні нового методу склейки зображень. Перевагою даного проекту є підвищення рівня точності, безпечності та компактності в порівнянні з низьким рівнем ціни на проект. До продажу виробникам потрібно мати особливі навички для створення приладу, а після продажу клієнти зможуть користуватися без спеціальних навичок, що робить прилад простим у використанні. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.21).

Таблиця 5.21. Визначення меж встановлення ціни.

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1000 – 2500 \$	20000 – 50000 \$	5000 – 60000\$	1500 – 2500\$

Виконавши аналіз рівня цін на товари замінники, товари аналоги та доходів цільової групи споживачів було сформовано нижню \$1500 та верхню

\$2500 межі встановлення ціни на товар, що дає цінову перевагу перед товарами конкурентів.

Таблиця 5.22. Формування системи збуту.

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна систему збуту
1	На сьогоднішній день клієнти купують продукцію безпосередньо у компанії розробника	- встановлення контактів зі споживачами, їх підтримка; - розробка і реалізація програм з підтримки лояльності клієнтів; - дослідницька робота зі збору маркетингової інформації.	Канал нульового рівня (виробник безпосередньо продає товар клієнту)	Збут продукції відбуватиметься безпосередньо через сайт виробника

Збут товару буде відбуватися через сайт розробника. Завдяки цьому можна легко встановлювати контакти зі споживачами та їх подальшу

підтримку, організовувати дослідницьку роботу зі збору маркетингової інформації та розробку і реалізацію програм підтримки лояльності клієнтів.

Таблиця 5.23. Концепція маркетингових комунікацій.

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій , якими користують ся цілові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціюван ня	Завдання рекламного повідомленн я	Концепція рекламного повідомлен ня
1	Клієнти дізнаються про нові продукти з реклами в інтернеті, наукових публікацій, сайтів компаній, соціальних мереж, за рекомендація ми інших людей, наукових конференціях	Соціальні мережі, публікації, інтернет	SMM, контент- маркетинг	Представлен ня товару з метою залучення та зацікавлення клієнтів	«Новий потужний і якісний метод склейки зображень»

Зважаючи на те, що цілові клієнти більше частину інформації про нові товари отримують через мережу інтернет, сайти, соціальні мережі та публікацій, то доцільними ключовими позиціями було обрано SMM та

контент-маркетинг. Завданням рекламного повідомлення є зацікавлення та позиціонування товару новим клієнтам. Також, необхідним є створювати наукові публікації та виступи на наукових конференціях.

5.6 Висновки

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок.

Попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребі в створенні нових дешевших і якісніших методів склейки зображень.

Інтенсивність конкуренції в сегменті в рамках України не значна, а вхід у сегмент є простим, але ускладнюється якщо виходити на міжнародний ринок.

Цільовою групою потенційних клієнтів є аграрії, військові та розвідка, розробники роботизованих систем які потребують якісних панорамних зображень або зображень з великими кутами зору.

В якості альтернативи впровадження проекту доцільно обрати проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії. За межами України є необхідність у виступах на конференціях та приймати участь у міжнародних виставках.

Перевагою даного проекту є підвищення рівня точності, безпечності та компактності в порівнянні з низьким рівнем ціни на проект. До продажу виробникам потрібно мати особливі навички для створення приладу, а після продажу клієнти зможуть користуватися без спеціальних навичок, що робить прилад простим у використанні. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Оскільки цільова аудиторія дізнається про нову продукцію переважно через мережу інтернет, спеціальних видань, профільних сайтів та публікацій, було вирішено, що найдоцільнішим шляхом розповсюдження продукції є сайт виробника. Також, необхідним є створювати наукові публікації та виступи на наукових конференціях.

Здійснення (імплементация) запропонованого проекту є доцільною, оскільки технології та проекти зі створення панорамних знімків залишаються та будуть актуальними у майбутньому.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській дисертації було розглянуто тематику багатоканальних оптико-електронних систем спостереження для склейки зображень. В ході розгляду даної тематики було обґрунтовано актуальність розробки та дослідження багатоканальних оптико-електронних систем. Поставлено ряд задач та цілей, серед яких: огляд літератури, розробка фізико-математичної моделі багатоканальної системи спостереження, проведення інженерних розрахунків, розробка конструкції та розробка стартап проекту.

Відповідно в першому розділі було проведено огляд літератури. В ході якого було розглянуто найпопулярніші аналоги даних систем, основною перевагою яких є наявність додаткового інтелектуального функціоналу. Також було розглянуто варіанти таких інтелектуальних систем на базі багатоканальних систем. Ще одним важливим етапом в огляді літератури був огляд компонентної бази, який дає представлення про ринок необхідних компонентів та їхню порівняльну характеристику.

В другому розділі було розглянуто фізико-математичну модель процесу отримання сигналу. Це дає змогу якіснішої оцінки готової системи та можливості глибшого аналізу при проектуванні системи. Також було розроблено математичну модель склейки зображень з можливими варіантами модифікацій на різних етапах. Це в свою чергу дає можливість для експериментів для покращення якості склейки.

Третій розділ був присвячений інженерним розрахункам. В ході роботи над якими було розроблено варіант об'єктива для багатоканальної системи спостереження. Далі було проведено абераційний аналіз який показав, що об'єктив задовольняє необхідним критеріям по якості та компенсації аберацій. Після чого було проведено енергетичний розрахунок, в ході якого було розраховано показник відношення сигнал/шум. Який показав, що в системі було правильно підібрано компоненти які в результаті дають відмінне відношення сигнал/шум.

Четвертий розробці конструкції. Основною задачею для цього розділу була розробка модульної, компактної та багатофункціональної конструкції, яка дозволить використовувати багатоканальну систему для використання з БПЛА та для вистрілу з 40 мм калібру. В ході проектування даної системи було вирішено дану задачу.

В кінці було розроблено стартап проект для багатоканальної системи спостереження. Завдяки аному розділу було виділено основні тези для позиціювання даної системи на ринкові. Також було представлено переваги даної системи, що компенсують недоліки в порівнянні з конкурентами. Одним із найважливіших моментів був розгляд можливих ризиків в ході виходу на ринок і відповідно було розглянуто контр заходи для обмеження та виправлення даних ризиків. Також було виділено основні тези для маркетингової компанії для стартап проекту.

Відповідно можна зроби висновки, що в даній дисертації успішно було розроблено багатоканальну систему спостереження для склейки зображень, яка буде конкурентною на ринкові та яка буде задовільнити якісним потребам споживачів. Однією з особливостей системи є модульна та багатофункціональна конструкція, яка значно покращує привабливість на ринкові. Також за рахунок якісної фізико-математичної моделі приладу є варіанти покращення та модифікації системи, що дозволяє в майбутньому покращувати дану систему. Відповідно в процесі проектування та розробки була закладена можливість програмного і конструкційного покращення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ARGUS-IS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.baesystems.com/en-us/product/autonomous-realtime-ground-ubiquitous-surveillance-imaging-system-argusis>.
2. Boomerang Drone Map [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.identifiedtech.com/blog/construction-drone-white-papers/can-you-map-a-100-acre-job-site-in-9-minutes/>.
3. Luftronix [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.luftronix.com/>.
4. Comprehensive Study And Review Of Image Mosaicing Methods / [M. Hetal, J. Pinal, G. Sandip]. // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2012. – С. 46–53.
5. Arya Mary K. J. Panoramic Image Stitching based on Feature Extraction and Correlation / K. J. Arya Mary, S. Priya. // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2017. – С. 32–39. Workshop on Computing in Civil Engineering. – 2011. – С. 67–76.
6. EVERDRONE [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.everdrone.com/>.
7. A Machine Learning Approach to Visual Perception of Forest Trails for Mobile Robots / [A. Giusti, J. Guzzi, D. C. Ciresan та ін.]. // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2016. – С. 661–667.
8. Deep learning startup Neurala raises \$14 million to build brains for drones, autonomous cars, and more [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://venturebeat.com/2017/01/17/brains-for-bots-deeplearning-startup-neurala-raises-14-million/>.
9. SONY IMX219 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://github.com/rellimot/Sony-IMX219-Raspberry-Pi-V2-CMOS/blob/master/RASPBERRY%20PI%20CAMERA%20V2%20DATASHEET%20IMX219PQH5_7.0.0_Datasheet_XXX.PDF.

10. OmniVision [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/RaspberryPi/ov5647_full.pdf.
11. Toshiba [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.semiconductorstore.com/cart/pc/viewPrd.asp?idproduct=67069>.
12. Cypress CSI chip [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.cypress.com/file/133591/download>.
13. NRF module [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://arduino.ua/prod231-radiomodyl-nrf24l01-2-4-ggc>.
14. Cypress WIFI module [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.cypress.com/file/298236/download>.
15. Raspberry Pi 3 Model B+ - Raspberry Pi [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.
16. Odroid-xu4 - ODROID Wiki [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://wiki.odroid.com/odroid-xu4/odroid-xu4>.
17. Jetson TX2 Module | NVIDIA Developer [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://developer.nvidia.com/embedded/buy/jetsontx2>.
18. Williams C. S. Introduction to the Optical Transfer Function / C. S. Williams, O. A. Becklund. – Bellingham: SPIE press, 2002. – 414 p.
19. Holst G. C. CCD arrays, cameras and displays / Gerald C. Holst. – Bellingham: SPIE Press, 1998. – 378 p.
20. Vollmerhausen R. H. Analysis of Sampled Imaging Systems / R. H. Vollmerhausen, R. G. Driggers. – Bellingham: SPIE Press, 2000. – 176p.
21. Holst G. C. Sampling, aliasing, and data fidelity for electronic imaging systems, communications, and data acquisition / Gerald C. Holst. – Bellingham: SPIE Press, 1998. – 326 p.

22. Wang, J., Shi, F., Zhang, J., Liu, Y.: A new calibration model and method of camera lens distortion. PR 41(2), 607–615 (2008).
23. Thormählen, T., Broszio, H., Wassermann, I.: Robust line-based calibration of lens distortion from a single view. Computer Vision / Computer Graphics Collaboration for Model-based Imaging Rendering, Image Analysis and Graphical Special Effects, 105–112 (2003).
24. Textures Zhengdong Zhang, Yasuyuki Matsushita and Yi Ma.: Camera Calibration with Lens Distortion from Low-rank. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 2011.
25. Abad F., Camahort E., Vivó R. Camera Calibration Using Two Concentric Circles. Image Analysis and Recognition. ICIAR (2004). Lecture Notes in Computer Science, vol 3211. Springer, Berlin, Heidelberg.
26. Forsyth, D., Mundy, et al.: Invariant Descriptors for 3-D Object Recognition and Pose. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., vol. 13.
27. Features from Accelerated Segment Test [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://docs.opencv.org/master/df/d0c/tutorial_py_fast.html.
28. Ashwini P., Jayalaxmi H.. Image mosaicing using SIFT and Corner Detection Algorithm. International Journal of Advanced Technology an Engineering Research, Vol 4. Issue 2, March 2014.
29. Histogram of oriented gradients [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.learnopencv.com/histogram-of-oriented-gradients/>.
30. Feature Matching using Brute Force Matcher [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://thedevnotebook.wordpress.com/2019/03/13/feature-matching-using-brute-force-matcher/>.

31. Y. Tian, L. Deng and Q. Li, "A KNN Match Based Tracking-Learning-Detection Method with Adjustment of Surveyed Areas," 2017 13th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Hong Kong, 2017, pp. 447-451.
32. Image Alignment (Feature Based) using OpenCV [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.learnopencv.com/image-alignment-feature-based-using-opencv-c-python/>.
33. M. A. Fischler and R. C. Bolles (June 1981). "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". Comm. of the ACM 24: 381--395.
34. Mrs. Hetal M. Patel, A. P. (November- 2012). Comprehensive Study and Review of Image Mosaicing Methods. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1 Issue 9, ISSN: 2278- 0181.